



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

David Manuel de Campos Aguiar

**EFEITO DO TEMPO DE IMERSÃO EM AMBIENTE
SALINO NA RESPOSTA À FADIGA DE
LAMINADOS VIDRO/EPÓXIDO**

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

Outubro de 2021

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Efeito do tempo de imersão em ambiente salino na resposta à fadiga de laminados vidro/epóxico

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

Effect of immersion time in a saline environment in response to the fatigue of glass/epoxide laminates

Autor

David Manuel de Campos Aguiar

Orientadores

Ana Paula Bettencourt Martins Amaro

Ricardo Nuno Madeira Soares Branco

Júri

Presidente	Professora Doutora Maria Augusta Neto Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Orientador	Professor Doutor Ricardo Nuno Madeira Soares Branco Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais	Professor Doutor Paulo Nobre Balbis dos Reis Professor Associado da Universidade de Coimbra
---------------	--

Coimbra, outubro, 2021

Agradecimentos

Gostaria de deixar umas palavras de agradecimento a algumas pessoas pelo apoio e colaboração, sem elas o trabalho que aqui se apresenta não era de todo possível.

Aos meus orientadores, Professora Doutora Ana Paula Bettencourt Martins Amaro e Professor Doutor Ricardo Nuno Madeira Soares Branco, por toda a orientação, conhecimento, ajuda e disponibilidade.

À professora Doutora Maria Augusta Neto pela ajuda e disponibilidade na pintura das amostras e na calibração das câmaras.

A todos os meus amigos que me acompanharam e ajudaram ao longo deste percurso académico e tornaram tudo muito mais simples e agradável, um grande obrigado para eles.

Aos meus pais e a minha irmã que foram peça essencial para atingir esta meta académica, dando-me a motivação certa, sem eles do meu lado nada disto seria possível.

Por fim, agradecer a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Resumo

Nos dias que correm, o aumento da utilização dos materiais compósitos reforçados é cada vez mais notório em diversos ramos da engenharia, como o da aeronáutica, aeroespacial, indústria automóvel, indústria naval, construção civil e muitos outros. Este aumento tem tendência a aumentar nas próximas décadas, devido à necessidade que a engenharia sente na utilização de componentes mais leves em determinadas situações, mas garantindo propriedades mecânicas semelhantes às dos aços e das ligas de alumínio. No entanto, este tipo de material é suscetível a determinados ambientes e a determinados tipos de carga, acabando por provocar degradação da sua estrutura.

O principal objetivo deste estudo é avaliar o efeito que o tempo de imersão em água do mar provoca na resposta à fadiga de laminados vidro/epóxico. Para a realização dos ensaios experimentais foram utilizados provetes retangulares com um furo central. Foram comparados os valores obtidos para provetes de controlo, não imersos, com provetes sujeitos a diferentes tempos de imersão (0, 229 e 900 dias) sem pré-tensão, e obtidos para provetes sujeitos aos mesmos tempos de imersão, mas sujeitos a valores de pré-tensão de 25%, 50% e 75% do valor da tensão de rotura do material compósito. Os ensaios para tempos de imersão de 0 e 229 dias foram efetuados em trabalhos anteriores.

Relativamente aos provetes imersos durante 900 dias, foram efetuadas medições da massa para avaliar a percentagem de água absorvida pelo material ao longo do tempo. Foram, também, realizados ensaios de tração para avaliar o efeito do tempo de imersão nas propriedades mecânicas. Foram, ainda, realizados ensaios para avaliar o efeito do tempo de imersão na resistência à fadiga para carregamentos uniaxiais de tração com razões de tensão, iguais a 0,1. Os ensaios de fadiga foram acompanhados pelo sistema ótico VIC-3D, que tem por base o método de Correlação Digital de Imagem (DIC), com o objetivo de analisar os campos de deformação que se desenvolvem na região do furo.

Após 900 dias de imersão em água do mar, verificou-se uma redução na resistência à tração. Através dos ensaios de fadiga foi notório que para um tempo de imersão de 900 dias, ocorreu uma redução de vida significativa do material, quando comparada com a redução para 229 dias e 0 dias de imersão. Para provetes com pré-tensão, os resultados

obtidos nos ensaios de fadiga para provetes imersos 229 dias, quando comparados com os obtidos para provetes imersos 900 dias, não foram conclusivos. Apenas os provetes com uma pré-tensão de 50% apresentaram uma redução média de vida. Pelo contrário, tanto para uma pré-tensão de 25% como para 75%, verificou-se um aumento médio de vida. Através das imagens fornecidas pelo método DIC, foi possível acompanhar o campo de deformações na zona do furo e prever, com alguma precisão, o local de iniciação da rotura das amostras.

Palavras-chave: Fadiga de compósitos laminados, vidro/epóxico, Fadiga em água do mar, Curvas S-N, Mecanismos de dano, Absorção de água.

Abstract

In the current world, an increase in the use of reinforced composite materials is noticeable in various branches of engineering, such as aeronautical, aerospace, automobile, naval, civil, and many others. This increase will also grow in the next decades, due to the need of using lighter components in specific situations with similar mechanical properties than those of steel and aluminum alloys. However, this type of material is susceptible to certain environments and loads, which may cause its rupture.

The main objective of this study is to evaluate the fatigue response of glass/epoxy laminates subjected to different immersion times. To perform the necessary experiments, rectangular cross-section samples with a central hole were used. The results obtained for control samples not immersed in seawater were compared to those obtained for samples subjected to different immersion times (0, 229, and 900 days) without pre-stress and for samples subjected to the same immersion times but subjected to pre-stress values of 25%, 50%, and 75% of the yield strength of the tested composite. The experimental tests for the immersion times of 0 and 229 days were performed in a previous research study.

Regarding the tests carried out for immersion times of 900 days, mass variations were measured over time to evaluate the percentage of absorbed water by the material. Tensile tests were conducted to evaluate the effect of immersion time on the mechanical properties. Tests were also conducted to evaluate the effect of immersion time on the variation of fatigue strength for uniaxial loading with a stress ratio, R , equal to 0,1. The VIC-3D optical system, which uses the Digital Image Correlation (DIC) method, was used during the fatigue tests to analyze the strain fields near the hole region.

After 900 days immersed in seawater, a reduction in tensile strength was observed. A significant reduction of the material's life was found for the samples immersed 900 days, when compared to the fatigue life for the samples immersed 229 days and 0 days. For the samples subjected to pre-stress values, the fatigue results obtained for 229 and 900 days were inconclusive. Only the samples with 50% prestress presented a reduction of life. On the contrary, the samples with 25% and 75% prestress led to higher fatigue lives. Through the images supplied by the DIC method, it was possible to follow the strain fields near the

hole region and predict, with a certain degree of accuracy, the sites around the hole where failure is likely to occur.

Keywords Laminated composites, Glass/epoxy, Fatigue in seawater, S-N curves, Damage mechanisms, Water absorption.

Índice

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xiii
Simbologia e Siglas	xv
Simbologia.....	xv
Siglas	xvi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. ESTADO DA ARTE	3
2.1. Materiais Compósitos	3
2.1.1. Compósitos de matriz polimérica.....	4
2.1.2. Compósitos reforçados com fibras de vidro	5
2.1.3. Crescimento e desenvolvimento dos materiais compósitos	6
2.2. Utilização de laminados vidro/epóxico na indústria naval.....	9
2.3. Degradação estrutural do material	9
2.4. Influência da água do mar nas propriedades de um material compósito	10
2.5. Mecanismos de falha	11
2.5.1. Rotura da matriz	11
2.5.2. Rotura das fibras.....	12
2.5.3. Perda de coesão entre a matriz e as fibras	12
2.5.4. Delaminação	13
2.6. Fenómeno de fadiga em matérias compósitos	13
2.6.1. Principais parâmetros nos ensaios de fadiga	14
2.6.2. Curvas S-N	15
2.7. Extensometria ótica.....	16
3. MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	19
3.1. Materiais utilizados.....	19
3.1.1. Geometria dos provetes utilizadas nos ensaios	20
3.2. Medição da massa dos provetes após imersão.....	21
3.3. Ensaios	22
3.3.1. Ensaios à tração	22
3.3.2. Ensaios à fadiga	24
3.4. Extensometria ótica.....	27
3.5. Mecanismos de falha	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4.1. Absorção da água do mar.....	29
4.2. Ensaios de tração	32
4.3. Ensaios de fadiga em provetes sem pré-tensão.....	34
4.4. Ensaios de fadiga em provetes com pré-tensão	36
4.5. Evolução de dano com base na rigidez do provete	39
4.6. Evolução de dano através do método DIC.....	41

4.7. Evolução de dano com base na análise das imagens obtidas pelo VIC-3D	43
4.8. Mecanismos de falha	47
5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	53
5.1. Proposta para trabalhos futuros	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Diferentes tipos de formas e distribuições do reforço.....	6
Figura 2.2. Evolução dos materiais de engenharia ao longo dos anos [12][13].....	7
Figura 2.3. Aplicações de laminados vidro/epóxico; a) prancha de surf; b) casco de barco.	9
Figura 2.4. Danos mais frequentes na estrutura de um material compósito [22].	11
Figura 2.5. Gráfico representativo das curvas S-N, dividido em três regiões: 1) região de baixos ciclos; 2) região intermédia; 3) região de elevados ciclos.	16
Figura 3.1. Provetes utilizados durante todo o procedimento experimental.	20
Figura 3.2. Dimensões dos provetes utilizados	21
Figura 3.3. Balança digital da marca AND modelo GH-202.	21
Figura 3.4. Esquema dos ensaios realizados.	22
Figura 3.5. Equipamento universal SHIMADZU Autograph AGS-X.	23
Figura 3.6. Máquina servo-hidráulica INSTRON 134 com as câmaras do <i>software</i> VIC-3D incorporadas.	24
Figura 3.7. Amostras após pintura, com padrão <i>speckle</i> .	27
Figura 3.8. Lupa ZEISS Stemi 2000-C.....	28
Figura 4.1. Percentagem de massa de água absorvida pelos provetes para dois tempos de imersão diferentes.....	31
Figura 4.2. Registo da percentagem em massa de água absorvida ao longo dos 900 dias de imersão.	31
Figura 4.3. Efeito do tempo de imersão nas curvas à tração.	34
Figura 4.4. Curvas S-N para provetes com diferentes tempos de imersão e sem pré-tensão (R=0,1).	36
Figura 4.5. Número médio de ciclos de vida para os diferentes valores de pré-tensão e para os diferentes tempos de imersão.....	38
Figura 4.6. Evolução da rigidez em função do número de ciclos para os três diferentes tempos de imersão, com a mesma amplitude de tensão ($\sigma_a = 61,6 \text{ MPa}$).....	39
Figura 4.7. Evolução da rigidez em função do número de ciclos para os três níveis de carga diferentes, com o mesmo tempo de imersão (900 dias).	40
Figura 4.8. Evolução da razão ϵ_1/ϵ_1 inicial em função do número de ciclos para os três diferentes tempos de imersão, com a mesmas amplitudes de tensão ($\sigma_a = 61,6 \text{ MPa}$).....	42
Figura 4.9. Evolução da razão ϵ_1/ϵ_1 inicial em função do número de ciclos para os três níveis de carga diferentes, com o mesmo tempo de imersão (900 dias).	43

-
- Figura 4.10. Evolução do campo da deformação principal, ϵ_1 , na proximidade do furo para um provete de controlo e sem pré-tensão (Provete N3): a) início do ensaio (0 ciclos); na fase intermédia do ensaio (12000 ciclos); e c) no último registo antes da rotura total do material (110000 ciclos) ($N_R=121935$)..... 44
- Figura 4.11. Evolução do campo da deformação principal, ϵ_1 , na proximidade do furo para um provete com 229 dias de imersão e sem pré-tensão (Provete N2): a) início do ensaio (0 ciclos); na fase intermédia do ensaio (40000 ciclos); e c) no último registo antes da rotura total do material (140000 ciclos) ($N_R=143463$). 44
- Figura 4.12. Evolução do campo da deformação principal, ϵ_1 , na proximidade do furo para um provete com 900 dias de imersão e sem pré-tensão (Provete N7): a) início do ensaio (0 ciclos); na fase intermédia do ensaio (10000 ciclos); e c) no último registo antes da rotura total do material (26000 ciclos) ($N_R=27727$). 45
- Figura 4.13. Evolução do campo da deformação principal, ϵ_1 , na proximidade do furo para um provete com 900 dias de imersão e com 25% de pré-tensão (Provete N1): a) início do ensaio (0 ciclos); na fase intermédia do ensaio (10000 ciclos); e c) no último registo antes da rotura total do material (205000 ciclos) ($N_R=318337$).... 46
- Figura 4.14. Evolução do campo da deformação principal, ϵ_1 , na proximidade do furo para um provete com 900 dias de imersão e com 50% de pré-tensão (Provete N4): a) início do ensaio (0 ciclos); na fase intermédia do ensaio (5000 ciclos); e c) no último registo antes da rotura total do material (20000 ciclos) ($N_R=24989$). 46
- Figura 4.15. Evolução do campo da deformação principal, ϵ_1 , na proximidade do furo para um provete com 900 dias de imersão e com 75% de pré-tensão (Provete N8): a) início do ensaio (0 ciclos); na fase intermédia do ensaio (70000 ciclos); e c) no último registo antes da rotura total do material (140000 ciclos) ($N_R=381847$).... 47
- Figura 4.16. Comparação entre o local da deformação principal máxima e o local de rotura do provete com 900 dias de imersão e sem pré-tensão (Provete N7): a) último registo antes da rotura total do material (26000 ciclos); e b) após rotura do provete ($N_R=27727$). 48
- Figura 4.17. Comparação entre o local da deformação principal máxima e o local de rotura do provete com 900 dias de imersão e com 25% de pré-tensão (Provete N1): a) último registo antes da rotura total do material (205000 ciclos); e b) após rotura do provete ($N_R=318337$). 48
- Figura 4.18. Comparação entre o local da deformação principal máxima e o local de rotura do provete com 900 dias de imersão e com 50% de pré-tensão (Provete N4): a) último registo antes da rotura total do material (20000 ciclos); e b) após rotura do provete ($N_R=24989$). 49
- Figura 4.19. Comparação entre o local da deformação principal máxima e o local de rotura do provete com 900 dias de imersão e com 75% de pré-tensão (Provete N8): a) último registo antes da rotura total do material (140000 ciclos); e b) após rotura do provete ($N_R=381847$). 49
- Figura 4.20. Diferentes tipos de dano observados à lupa: a) e b) provete com 900 dias de imersão e sem pré-tensão; c) provete com 900 dias de imersão ensaiado à tração. 50
-

Figura 4.21. Diferentes tipos de dano observados à lupa: a) provete com 900 dias de imersão e com 25% de pré-tensão; b) provete com 900 dias de imersão e com 50% de pré-tensão; c) provete com 900 dias de imersão e com 75% de pré-tensão.
..... 51

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Principais prós e contras das propriedades mecânicas dos materiais compósitos.	8
Tabela 3.1. Principais propriedades da resina utilizada na produção dos provetes [30].	20
Tabela 3.2. Dimensões exatas dos provetes ensaiados à tração.	23
Tabela 3.3. Dados utilizados na realização dos ensaios à fadiga.	26
Tabela 4.1. Massa dos provetes para diferentes tempos de imersão.	30
Tabela 4.2. Percentagem de água absorvida pelos provetes após 229 dias e 900 dias.....	30
Tabela 4.3. Valores obtidos nos ensaios à tração para provetes de controlo.....	32
Tabela 4.4. Valores obtidos nos ensaios à tração para provetes com 900 dias de imersão. 33	
Tabela 4.5. Percentagem de redução de resistência à tração, dos provetes de controlo para os provetes com 900 dias de imersão.	33
Tabela 4.6. Número de ciclos de vida até à rotura obtidos nos ensaios à fadiga, para provetes com diferentes tempos de imersão e sem pré-tensão; [*] Valores retirados de uma dissertação anterior [30].	35
Tabela 4.7. Valores obtidos para as vidas dos provetes nos ensaios à fadiga para os dois diferentes tempos de imersão; [*] Valores retirados de um dissertação anterior [30].	37

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

σ – Tensão

$\sigma_{m\acute{a}x}$ – Tensão máxima

$\sigma_{m\acute{i}n}$ – Tensão mínima

σ_m – Tensão média

σ_a – Tensão alternada

ϵ_1 – Primeira deformação principal

$\epsilon_{1\text{ inicial}}$ – Valor inicial da primeira deformação principal

δ – Deslocamento

m_0 dias de imersão – Massa dos provetes antes de sofrerem imersão

m_X dias de imersão – Massa dos provetes após X dias de imersão

T_g – Temperatura de transição vítrea

σ_R – Tensão de rotura

$\Delta\delta$ – Variação de deslocamento

ΔP – Variação da carga

P – Carga

A – Área

R – Razão de tensões

E – Módulo de elasticidade

N_R – Número de ciclos de vida até à rotura

N – Número de ciclos de vida

$F_{m\acute{a}x}$ – Força máxima

$F_{m\acute{i}n}$ – Força mínima

F_m – Força média

F_a – Força alternada

b – Comprimento

w – Largura

t – Espessura

d – Diâmetro

Siglas

DIC – Digital Image Correlation

CMM – Compósito de Matriz Metálica

CMC – Compósito de Matriz Cerâmica

CMP – Compósito de Matriz Polimérica

1. INTRODUÇÃO

O material compósito é o resultado da combinação de materiais inextinguíveis com composições, estruturas e propriedades distintas, com o objetivo de obter um material único que apresente maior desempenho. Os materiais compósitos já estão presentes na vida humana há muito tempo, muito antes da introdução deste conceito. O homem durante as construções mais antigas, já utilizava a palha como reforço do barro, ou até mesmo alguns materiais fibrosos a servir de reforço da lama, estando de uma forma inconsciente a utilizar e criar um material compósito.

O grande crescimento de utilização dos materiais compósitos ocorreu devido à necessidade que se fez sentir em utilizar materiais leves, mas com garantia de boas propriedades mecânicas, semelhantes às oferecidas pelos aços e pelas ligas de alumínio. O aumento de utilização dos materiais compósitos nos dias que correm é visível nos mais variados ramos da engenharia, como o da aeronáutica, aeroespacial, indústria automível, indústria naval, construção civil e muitos outros.

A grande parte das falhas que ocorrem nos materiais compósitos laminados devem-se a cargas cíclicas. Isto, porque a atuação deste tipo de cargas induz na estrutura do material danos que não são visíveis, como a rotura de fibras, pequenas roturas na matriz, delaminação ou perda de coesão entre as fibras e a matriz. Por este motivo, a realização de ensaios de fadiga permite perceber melhor o comportamento destes materiais quando sujeitos a cargas cíclicas, o que é muito útil para se conseguir estimar a vida à fadiga de um material com mais precisão. Contudo, o comportamento à fadiga de materiais compósitos é um assunto bastante complexo, pois depende de inúmeras variáveis, e está longe de ser totalmente compreendido.

O tipo de ambiente em que o material está inserido é um fator a ter em conta e com elevado grau de importância, uma vez que pode provocar degradação da estrutura do material e assim algumas das suas principais propriedades, nomeadamente, resistência e rigidez, podem ser afetadas. No caso desta dissertação, o objetivo é estudar o efeito do tempo de imersão na resposta à fadiga do laminado vidro/epóxico. Neste trabalho, considera-se um tempo de imersão de 900 dias em água do mar, e comparam-se os resultados obtidos com os

de provetes imersos 229 dias e com provetes não imersos. Pretende-se, também, analisar o efeito de valores de pré-tensão de 25%, 50% e 75% na vida à fadiga.

Esta dissertação é constituída por cinco capítulos. No Capítulo 2, é apresentado um levantamento bibliográfico sobre os materiais compósitos reforçados com fibras, o crescimento e desenvolvimento destes ao longo dos anos, a influência da água do mar na degradação da estrutura do material e alguns conceitos básicos acerca de fadiga. No Capítulo 3, é descrito o processo experimental utilizado bem com o material e os equipamentos utilizados. No Capítulo 4, são mostrados e comentados os resultados obtidos recorrendo aos processos descritos no capítulo anterior. No último capítulo, Capítulo 5, são apresentadas as principais conclusões obtidas com a realização desta dissertação e são propostos alguns trabalhos futuros.

2. ESTADO DA ARTE

O capítulo do Estado da Arte visa realizar um levantamento bibliográfico sobre conceitos fundamentais para esta dissertação.

Será feita uma abordagem geral aos materiais compósitos, as suas principais propriedades, o crescimento e desenvolvimento nos últimos anos em alguns ramos da engenharia, a influência da água do mar na degradação da sua estrutura, conceitos principais a reter sobre o comportamento à fadiga deste tipo de materiais, os principais mecanismos de falha, e aborda-se de forma resumida o tema da extensometria ótica.

2.1. Materiais Compósitos

Um material compósito é um material formado pela combinação de materiais imexíveis com composições, estruturas e propriedades distintas, com o objetivo de obter um produto de melhores propriedades mecânicas. A união de materiais diferentes confere ao material novas propriedades, propriedades estas inerentes a cada constituinte e ainda a propriedades intermédias que surgem da formação de uma região interfacial. A matriz garante a ligação do reforço, e este confere a resistência ao material.

Assim sendo, quando é criado um novo material, podem-se combinar materiais de maneira particular de modo a colocar em evidência as características desejáveis e minimizar as indesejáveis [1].

Entre os diversos materiais existentes, os materiais compósitos apresentam a particularidade de poder substituir o aço e o alumínio, e por vezes garantindo um melhor desempenho. Com estas substituições é possível obter peças finais com um peso muito inferior. Os compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras têm vindo a substituir em grande escala os aços inoxidáveis, em aplicações que requerem excelentes propriedades mecânicas, pois apresentam ótimo peso específico, elevada resistência específica e elevada rigidez [2].

Os materiais compósitos podem ser diferenciados segundo o tipo de matriz e o tipo de reforço. Quanto ao tipo de matriz, podem ser de natureza metálica (CMM), cerâmica

(CMC) ou polimérica (CMP). Os reforços podem apresentar-se na forma de fibras, partículas ou flocos [3].

O compósito em estudo é constituído por uma matriz polimérica (epóxida) e por um reforço de fibras de vidro. A matriz epóxida liga e suporta as fibras de vidro, absorve deformações e garante resistência à compressão. As fibras de vidro conferem um aumento de tenacidade do material e um aumento da resistência à tração, a solicitações com igual orientação das fibras.

2.1.1. Compósitos de matriz polimérica

Nos compósitos a matriz assume diversas funções, para além de garantir coesão das fibras garante também a proteção das fibras do meio ambiente, permite distribuir o carregamento pelas fibras e permite ainda redistribuir o carregamento pelas fibras em caso de rotura de alguma delas.

A matriz polimérica, a nível de desempenho e variedade de aplicações, tem ganho grande destaque em relação aos outros tipos de matriz, devido às principais propriedades mecânicas que esta oferece, baixa densidade e facilidade de processamento a baixa pressão e temperatura. A matriz polimérica é caracterizada como uma matriz plástica, adesiva, macia e relativamente dúctil [3].

As resinas epoxídicas, são muito utilizadas no processamento de compósitos, isto graças às excelentes propriedades que garantem. Este tipo de resinas apresenta ótimas propriedades mecânicas, tais como, elevada resistência mecânica, elevado módulo de elasticidade, baixa taxa de contração de volume após o processo de cura e baixo coeficiente de expansão térmica. Além disso, apresenta também elevada resistência à corrosão e a agentes químicos [4].

Relativamente à humidade, as matrizes epoxídicas apresentam elevada capacidade de absorção o que faz com que estas se tornem fortemente condicionadas pela humidade, verificando-se que a temperatura de transição vítrea (T_g) sofre uma redução entre 10 a 20°C, por cada 1% de ganho de massa [5].

A matriz epóxida é uma resina termoendurecível, este tipo de resinas necessita de um processo de cura, processo esse que consiste na formação de ligações por aquecimento ou por reação química [6]. Assim sendo, quando se dá a mistura da resina com o endurecedor, ocorre uma reação exotérmica, originando assim a cura da mesma e assumindo

o composto a geometria pretendida. Durante o processo de cura é aconselhável submeter o compósito a elevadas temperaturas e pressões de forma a minimizar possíveis defeitos que possam surgir na estrutura do material e assim obter melhores propriedades estruturais. Este tipo de resinas permite operar a temperaturas relativamente elevadas, pois apresenta reduzida variação das propriedades em função da temperatura. Um ponto negativo é que, embora exista grande utilização destas resinas, elas são extremamente difíceis de reciclar quando apresentam elevado nível de cura [4][7].

2.1.2. Compósitos reforçados com fibras de vidro

Os materiais compósitos são normalmente constituídos por fibras como material de reforço e estas podem ser contínuas ou curtas. O reforço é mais resistente do que a matriz e tem com principal função suportar as cargas que são aplicadas na estrutura. Nos casos em que este apresenta a forma de fibras contínuas, confere ao material maior capacidade de resistência a cargas de tração com a mesma direção que a orientação das fibras [8]. De entre as características do compósito, a resistência à tração, é determinada pelas propriedades mecânicas da fibra. As fibras suportam entre 70% a 90% da carga que é aplicada sobre a estrutura do material compósito. Além disso, as fibras também aumentam a rigidez e a estabilidade térmica [4][9].

A distribuição e orientação das fibras pelo material compósito é de grande importância para as propriedades mecânicas do produto final. Uma distribuição das fibras em paralelo, fibras contínuas unidirecionais, confere ao laminado elevada resistência mecânica na direção das fibras, embora, na direção transversal às fibras há défice de resistência, sendo esta apenas oferecida pela matriz, cujas principais funções são a ligação e o suporte das fibras. Uma distribuição de fibras perpendiculares umas as outras, fibras contínuas bidirecionais, permite obter elevada resistência em direções transversais [4].

Na Figura 2.1, está representado um esquema com os diferentes tipos de formas e distribuições de reforços utilizados em compósitos, referidos anteriormente.

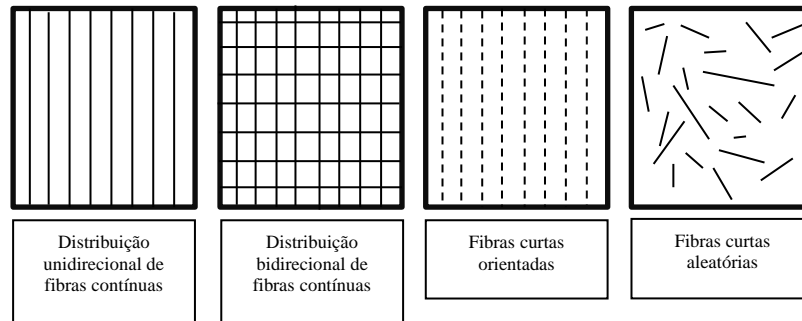


Figura 2.1. Diferentes tipos de formas e distribuições do reforço.

De todas as fibras existentes no mercado, as fibras de vidro são umas das mais utilizadas na indústria para reforço dos polímeros, a sua vasta gama de aplicações deve-se ao facto de apresentarem baixo custo e elevada resistência, embora apresentem módulo de elasticidade e resistência à tração inferiores aos das fibras de carbono ou de aramida [3]. Dentro do grupo restrito das fibras de vidro, as fibras mais utilizadas são as E-glass (elétrico) e as S-glass (elevada resistência mecânica). Todavia, as fibras do tipo E são as mais utilizadas nos materiais compósitos, isto devido à boa relação entre desempenho e custo [4][10]. Este tipo de fibras começou a ser utilizado devido à sua elevada capacidade de isolar a eletricidade, e assim obter materiais compósitos com propriedades de isolante elétrico. As fibras do tipo S apresentam a particularidade de possuírem melhores propriedades mecânicas, como, maior rigidez e maior resistência à tração, porém, são mais caras.

2.1.3. Crescimento e desenvolvimento dos materiais compósitos

Os materiais compósitos estão presentes na vida do ser humano há largos anos. Já antigamente, o homem usava nas construções a palha a servir de reforço ao barro, ou então como outra alternativa, materiais fibrosos a servir de reforço à lama. Isto é, com materiais bem distintos que a natureza oferecia, o homem já procurava combiná-los com o objetivo de chegar a um material com as propriedades desejadas, acabando, na verdade, por estar a usar um material compósito [7][11].

O avanço da tecnologia e o aumento da exigência dos materiais levou ao aparecimento de compósitos capazes de corresponder às necessidades sentidas naquele momento.

Em 1930, começaram a aparecer os primeiros compósitos, nesse tempo eram denominados por compósitos modernos, combinando uma resina com um reforço de fibras de vidro. A aplicação de compósitos era mais localizada na construção de barcos e aviões, devido à necessidade de utilizar materiais leves e que mantivessem as propriedades estruturais dos componentes [3][7].

Em 1940, como o aumento de utilização e o bom desempenho os materiais compósitos começaram a ganhar dimensão em alguns ramos da engenharia, sendo utilizados em componentes para fins militares, aeroespaciais, navais e automóvel [7].

Nos últimos anos do século XX, houve um aumento acentuado da utilização destes materiais, expandindo-se e ganhando grande reconhecimento em vários ramos, nomeadamente, o da aeronáutica, aeroespacial, indústria automóvel e construção civil.

Como podemos observar na Figura 2.2, a importância dos materiais compósitos é cada vez maior nos últimos anos, isto, devido às ótimas qualidades que oferecem, à sua vasta gama de aplicações e as diversas combinações que podem ser feitas de maneira a obter o material com as propriedades desejadas. Este aumento do uso de materiais compósitos deve-se, principalmente, ao facto de estes estarem a substituir os materiais metálicos, pois, apresentam menor custo por ciclo de vida e uma vida útil superior.

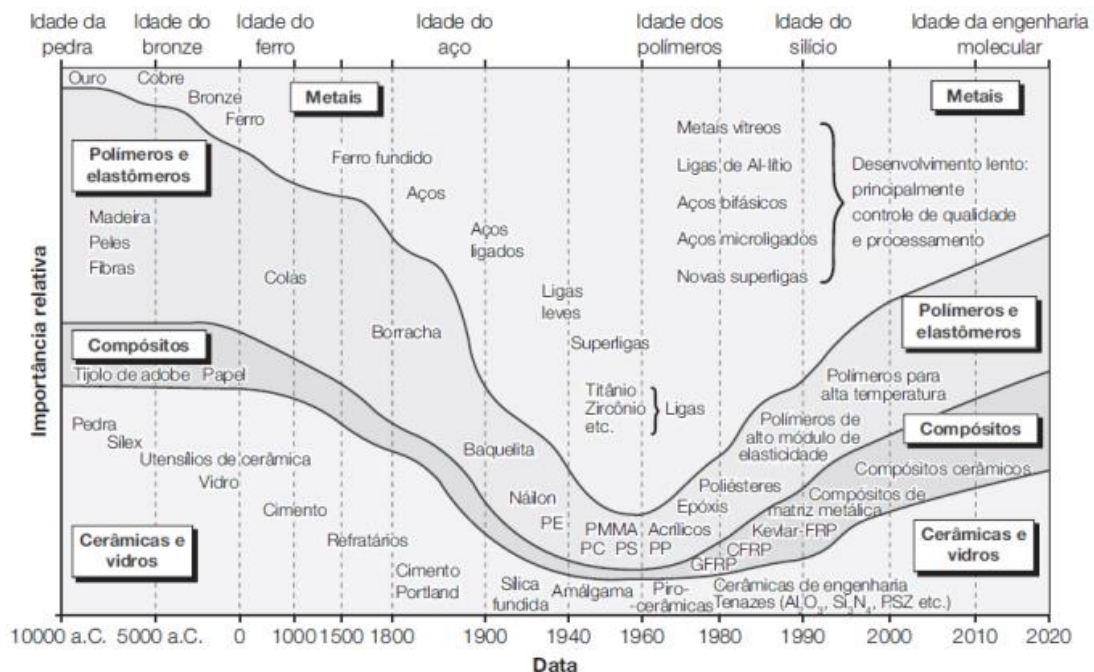


Figura 2.2. Evolução dos materiais de engenharia ao longo dos anos [12][13].

Uma das propriedades de relevância nos materiais compósitos que permitiu um aumento acentuado de utilização foi a sua elevada resistência à fadiga, em comparação com os aços e as ligas de alumínio com maior durabilidade, estes materiais conseguem trabalhar até um ponto muito próximo da sua carga de rotura. Este tipo de materiais apresenta também menor vibração e ruído que os materiais metálicos [4][14].

O principal senão deste tipo de materiais está relacionado com o processo de fabrico, apresentam um elevado custo de produção, dificuldade em produzir formas complexas e em garantir que se mantêm as propriedades mecânicas em todas as peças, numa produção em grande quantidade, bem como menor resistência a alta temperatura [4][15].

Na Tabela 2.1, são apresentadas, de uma forma geral, os principais prós e contras dos materiais compósitos em relação a outros materiais, que fazem com que a procura destes tenha subido tanto nos últimos anos, nos diversos ramos industriais.

Tabela 2.1. Principais prós e contras das propriedades mecânicas dos materiais compósitos.

Prós	Contras
<ul style="list-style-type: none">• Elevada resistência específica;• Elevado módulo específico;• Boa resistência à fadiga;• Boa resistência à corrosão;• Baixo coeficiente de expansão térmico;	<ul style="list-style-type: none">• Elevada anisotropia;• Elevado custo de produção, em comparação com as ligas metálicas;• Produção em pequenas séries;• Absorção de humidade.

2.2. Utilização de laminados vidro/epóxico na indústria naval

A utilização de materiais laminados vidro/epóxico em cascos de pequenos barcos, hélices de barcos, pranchas de surf e entre outros componentes da indústria naval, já vem de há muitos anos. Mas nos últimos anos, a indústria naval tem ganho grande importância e aumentado a utilização deste tipo de materiais. Devido as propriedades mecânicas garantidas, como, ótimo peso, ótima relação resistência/peso e o ótimo custo competitivo, os compósitos de fibras de vidro ganharam uma extensa popularidade no ramo da indústria naval [16]. São apresentados alguns exemplos de aplicações na Figura 2.3.



Figura 2.3. Aplicações de laminados vidro/epóxico; a) prancha de surf; b) casco de barco.

2.3. Degradação estrutural do material

A degradação estrutural de um material é um fator com elevado grau de importância, uma vez que algumas das suas propriedades principais, tais como a resistência e rigidez, podem ser altamente afetadas. Neste caso, é muito importante investigar e estudar a influência do meio ambiente no qual o material será inserido, porque pode provocar mudanças irreversíveis nas suas propriedades, acabando por deixar o material débil, com pouca resistência e sem capacidade para desempenhar o papel para o qual foi projetado.

A humidade é um dos fatores que mais condiciona os materiais compósitos. Afeta a matriz, as fibras e a interface de contacto entre elas, levando mesmo à perda de coesão entre a matriz e as fibras, acabando por condicionar a vida do material e, em muitos casos, originar a falha final do material. O contacto direto com a água acaba por promover o deslocamento desta para o interior do material através da interface matriz/fibra mas também pode ocorrer através de defeitos presentes na estrutura, como fissuras na matriz, que possam surgir durante a produção do material ou devido a fatores ambientais ou até mesmo devido a uma má utilização do material [5].

2.4. Influência da água do mar nas propriedades de um material compósito

A água do mar é um ambiente bastante corrosivo, principalmente para os materiais metálicos, tornando-os débeis e acabando por destruí-los. Com isto, sentiu-se a necessidade de ir substituindo os materiais metálicos, que estão inseridos neste tipo de ambiente, por materiais que apresentem boa resistência à corrosão. Os materiais compósitos pareceram uma opção muito viável, no entanto, é necessário estudar e analisar os efeitos que a água do mar pode provocar nas suas estruturas, e assim verificar se estes são uma opção viável ou não.

Huang e Sun [17] investigaram o efeito da imersão em água na resistência à tração e no comportamento à flexão de materiais compósitos. Os resultados experimentais obtidos demonstram que houve uma ligeira redução da resistência mecânica, no entanto, verificou-se uma melhoria no comportamento à flexão.

Kootsookos e Mouritz [18] investigaram o efeito da imersão em água do mar na durabilidade de compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro. Os resultados experimentais obtidos demonstram que os compósitos imersos em água do mar, num período superior a dois anos, devido à absorção de água, sofreram degradação química da interface matriz/fibra e da resina, e assim, sofrem uma redução da plasticidade da matriz.

Nos compósitos constituídos por fibras, as fibras silícicas induzem alterações no processo de absorção de água por parte da resina epóxi, reduzindo o ganho relativo de massa de água, mas, no entanto, a superfície da fibra de vidro pode provocar mudanças na estrutura da matriz epóxi. A ocorrência deste fenómeno implica uma expansão volumétrica entre as fibras e a matriz, provocando o aparecimento de tensões localizadas no compósito, implicando uma redução das propriedades mecânicas e deixando este mais suscetível ao aparecimento de falhas [18][19].

É importantíssimo que os materiais compósitos mantenham as suas propriedades mecânicas sem que ocorra degradação da estrutura do material. No entanto, como foi referido, em ambiente aquático as moléculas de água penetram com enorme facilidade e rapidez nos compósitos, em particular na interface da matriz com as fibras devido à capilaridade presente na resina, acabando por degradar as ligações através de reações de hidrólise. Isto pode levar à separação da matriz com as fibras [17][18].

2.5. Mecanismos de falha

Nos últimos anos, o estudo dos mecanismos de falha de compósitos laminados tem ganho grande interesse por parte dos investigadores. Ainda que os compósitos poliméricos reforçados por fibras tenham assegurado uma evolução no seu desempenho, este tipo de materiais apresenta elevada sensibilidade ao dano quando sujeitos a carregamentos excessivos, impactos, fadiga ou a certos fatores ambientais. Os danos que ocorrem com maior frequência nestes materiais são: rotura da matriz, perda de coesão entre as fibras e a matriz, delaminação e rotura das fibras, todos estes podem provocar uma falha estrutural do material. Sendo assim, é então compreendido como falha de um material, quando este já não pode desempenhar mais a função para a qual foi projetado [20][21].

Na Figura 2.4, é possível observar os diferentes tipos de dano que ocorrem com maior frequência nos materiais compósitos.

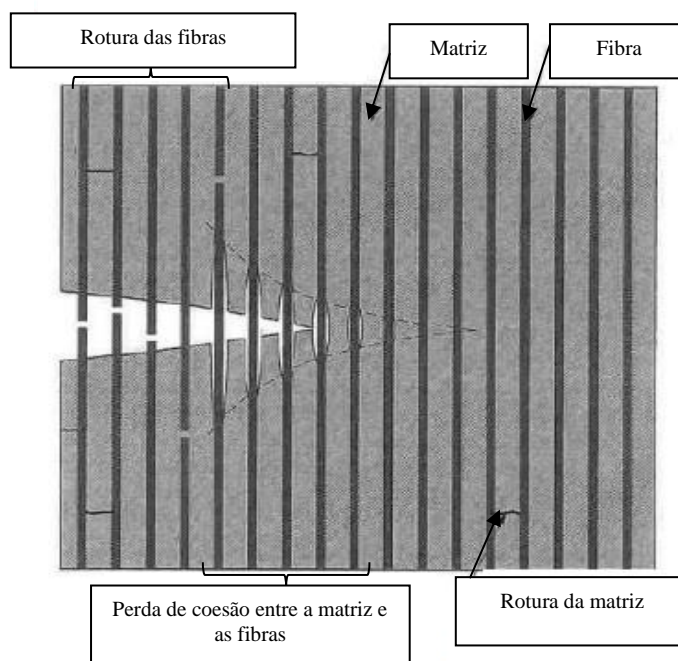


Figura 2.4. Danos mais frequentes na estrutura de um material compósito [22].

2.5.1. Rotura da matriz

Grande parte das falhas que ocorrem nos materiais compósitos são causadas por danos na matriz. Tendo esta a principal função de proteger o reforço, é expectável que quando apresentar qualquer tipo de dano, o reforço fique muito mais exposto e sensível a carregamentos e a fatores ambientais, o que pode levar a uma rotura prematura [23].

O dano que ocorre com maior frequência na matriz é a fissuração, pois é muito difícil produzir um compósito de matriz polimérica sem quaisquer espaços vazios, mesmo com um controlo de produção rigoroso. E são estes espaços vazios um dos fatores que estão na origem do aparecimento das fissuras. Este tipo de dano compromete o desempenho do material, no tipo de meio em estudo, pois as fissuras permitem uma entrada mais fácil da água para o interior da estrutura do material, acabando por degradar a estrutura e reduzir a vida do material. Mas também a presença de tensões na interface da matriz com as fibras pode provocar o aparecimento de microfissuras na matriz [10].

2.5.2. Rotura das fibras

Falhas ao nível das fibras são as mais graves e as que podem precipitar o fim de vida do material. As fibras são fundamentais, pois são elas que absorvem grande parte da energia das solicitações externas e que conferem grande parte ou quase a totalidade de resistência ao material compósito. Este tipo de falhas é mais frequente ocorrer em solicitações à tração, quando a tensão máxima admissível é atingida, acabando assim o material por perder, quase na totalidade, a sua função estrutural.

2.5.3. Perda de coesão entre a matriz e as fibras

A transferência de carga entre as fibras e a matriz só é possível quando existe uma ligação com boa coesão na interface entre elas. Ao ocorrer rotura de uma fibra, a carga suportada por essa fibra é transferida e dividida pelas fibras vizinhas através da matriz, mas para que tal aconteça é necessário que as fibras estejam ligadas à matriz. A falta de coesão na ligação diminui o mecanismo de transferência de carga e aumenta a exposição das fibras aos fatores ambientais, um exemplo é a exposição à humidade. Se a ligação existente for boa, o material apresenta melhor resistência à fadiga [10].

Longos períodos de imersão favorece a absorção de água por parte da matriz, e como já foi referido anteriormente, essa absorção provoca uma diminuição de aderência entre a matriz e as fibras. Então, como existe uma maior facilidade no deslocamento entre a matriz e as fibras, o material tende a reduzir a sua resistência mecânica.

2.5.4. Delaminação

A falha por delaminação é definida como a separação entre duas camadas adjacentes do composto laminado [22]. Os compósitos laminados são muito suscetíveis a sofrerem delaminação, sendo um fator a ter em conta na utilização deste tipo de materiais. Este tipo de falhas ocorre na fronteira entre duas camadas, normalmente, camadas com diferentes orientações de fibras ou com diferentes propriedades mecânicas. Vários fatores influenciam o aparecimento deste tipo de dano e consequente degradação do material, tais como os esforços aplicados, concentração de tensões, fatores ambientais e temperatura de trabalho [24].

2.6. Fenómeno de fadiga em matérias compósitos

Fadiga mecânica é um mecanismo em que ocorre rotura lenta e progressiva do material, devido à propagação de defeitos existentes no material aquando da aplicação de carregamentos cíclicos. O número total de falhas por fadiga encontra-se entre os 50% e os 90%, sendo que a maioria deste tipo de falhas não tem previsão exata de ocorrência, isto é, ocorre de forma inesperada e repentina, causando por vezes situações de elevado perigo [25]. Com recurso aos ensaios de fadiga é possível obter as curvas de tensão–número de ciclos até à rotura, conhecidas por curvas S-N, servindo estas para ajudar a prever a vida à fadiga do material em estudo.

O processo de fadiga em compósitos reforçados com fibras é um processo muito complexo, tendo um comportamento diferente daquele que se verifica nos materiais metálicos, uma vez que as cargas estão constantemente a ser redistribuídas sobre a estrutura do material, pois estes materiais apresentam elevada anisotropia. No entanto, a metodologia baseada nas curvas S-N, usada para os metais, pode também ser usada nos materiais compósitos [26][27][28].

Os materiais quando submetidos a cargas de fadiga, apresentam uma redução gradual das suas propriedades, tais como, rigidez, módulo de Young e resistência às solicitações. No entanto, a resistência de um material à fadiga está dependente de muitos fatores, entre eles, fatores ao nível da produção, como, acabamento superficial, defeitos internos e externos, tipo de carga, geometria da peça, etc. [6].

2.6.1. Principais parâmetros nos ensaios de fadiga

A vida de um material depende de muitos fatores. Para ciclos de maior carga dinâmica e de maior amplitude de carga estão associados menores tempos de vida, comparativamente com ciclos de menor carga dinâmica e de menor amplitude de carga.

A tensão, σ , a que um material está sujeito quando solicitado por cargas axiais, é dado pelo quociente entre a carga, P , e a área da secção transversal, A , como é apresentado na Equação (2.1).

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

Durante os ciclos de carga os materiais estão sujeitos, ciclicamente, a tensões máximas, $\sigma_{m\acute{a}x}$, e a tensões mínimas, $\sigma_{m\acute{i}n}$. Assim sendo, é possível calcular a tensão média, σ_m , com recurso à tensão máxima e à tensão mínima, através da Equação (2.2).

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \quad (2.2)$$

Um outro parâmetro que é importante definir para os ensaios à fadiga é a tensão alternada, σ_a . A tensão alternada pode ser calculada com recurso à tensão máxima e à tensão mínima, como mostra a Equação (2.3), ou então através da tensão máxima e da tensão média, como mostra a Equação (2.4).

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \quad (2.3)$$

$$\sigma_a = \sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_m \quad (2.4)$$

É possível realizar os ensaios de fadiga de diferentes formas, o que permite obter resultados e mecanismos de dano também diferentes. Esses diferentes tipos de ensaios são efetuados fazendo variar o tipo de carga aplicada, o tipo de ciclo ou a frequência do ciclo.

Um parâmetro a ter em conta nos ensaios de fadiga é a razão de tensão, R , sendo esta definida como o quociente entre a tensão mínima e a tensão máxima, como é apresentado pela Equação (2.5). Este parâmetro permite caracterizar o tipo de ciclo [22].

$$R = \frac{\sigma_{\text{mín}}}{\sigma_{\text{máx}}} \quad (2.5)$$

É possível obter diferentes tipos de ciclo, em função do valor e dos tipos de carga:

- Ciclo alternado, com $R = -1$, quando o valor da tensão média é nulo, ou seja, quando o módulo do valor da carga de tração é igual ao módulo do valor da carga de compressão;
- Ciclo pulsante, com $R = 0$, quando o valor da tensão mínima é nulo;
- Ciclo repetido, com $R \neq 0$, quando a tensão média é diferente de zero, pode ser de tração ou compressão.
- $0 \leq R < 1$, apenas existem cargas de tração;
- $1 < R < +\infty$, apenas existem cargas de compressão;
- $-\infty < R < 0$, existem combinações de cargas de tração com cargas de compressão.

A frequência do ensaio é um parâmetro importante e a ter em conta na realização dos ensaios à fadiga de materiais compósitos de matriz polimérica. A utilização duma frequência muito elevada provoca no material um aumento localizado de temperatura, alterando as propriedades de parte do material acabando por torná-lo frágil ao carregamento.

2.6.2. Curvas S-N

A maior parte das falhas que ocorrem nos materiais são causadas por processos de fadiga. As curvas de tensão, S , em função do número de ciclos, N , são muito interessantes e ajudam a caracterizar o comportamento à fadiga dos materiais sujeitos a cargas cíclicas, além da particularidade de permitirem obter resultados experimentais de uma forma simples e fácil. São uma ferramenta essencial para prever o tempo médio de vida à fadiga de um material para um dado valor de tensão.

Estas curvas são representadas por um gráfico de magnitude de tensão, S , pelo número de ciclos até à rotura, N_R , geralmente em escala bi-logarítmica. Sendo obtidas com recurso à equação (2.6) onde C' e b representam constantes.

$$\log(S) = \log(C') - b \times \log(N_R) \quad (2.6)$$

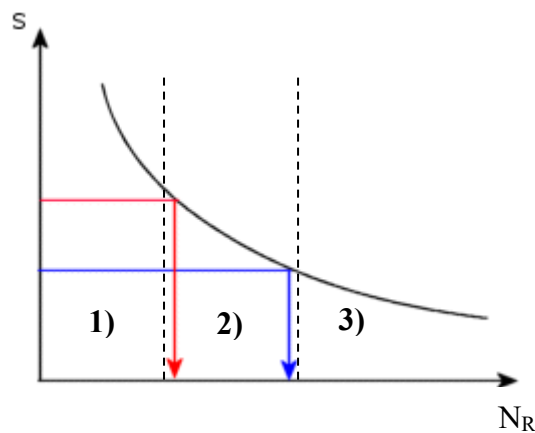


Figura 2.5. Gráfico representativo das curvas S-N, dividido em três regiões: 1) região de baixos ciclos; 2) região intermédia; 3) região de elevados ciclos.

Na Figura 2.5, está representado um gráfico típico das curvas S-N, o eixo relativo ao tempo de vida pode ser dividido em três regiões, região de baixos ciclos a que correspondem elevadas tensões, região de elevados ciclos a que correspondem baixas tensões e uma região intermédia delimitada pelas duas referidas anteriormente [22].

Na generalidade, observando a curva obtida para um dado material, à medida que a tensão aplicada diminui o material resiste a um maior número de ciclos, atingindo um dado valor de tensão para a qual o material apresenta vida infinita. Esse valor de tensão, que já não provoca rotura do material, é designado por limite de fadiga ou resistência à fadiga.

2.7. Extensometria ótica

Na engenharia, é de elevada importância conhecer as tensões e as deformações que ocorrem na estrutura de um material, pois assim, é uma forma de agir e de prevenir possíveis inconvenientes. Um material que sofra um grau de deformação muito elevado corre o risco de perder a função para a qual foi projetado. Em certas aplicações estruturais, de modo a quantificar o dano, podem ser usados medidores de deformação, tais como extensómetros, para avaliar o campo de deformações do material [29].

Um extensómetro é então na prática, um sensor que mede as deformações que ocorrem no material em função das tensões aplicadas. Um dos métodos que pode ser utilizado como sensor é a correlação digital de imagem (DIC), que permite obter o campo

de deslocamentos e deformações superficiais sob ação de cargas cíclicas. Os extensómetros óticos medem a deformação axial, isto é, medem o deslocamento entre dois pontos no material em estudo. Para tal, é necessário criar um padrão, designado por *speckle*, a partir de marcas claras ou escuras, de maneira a conseguir definir pontos fixos, para que seja possível medir o deslocamento com maior facilidade, entre esses mesmos pontos.

3. MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O principal objetivo deste estudo é avaliar o efeito do tempo da água do mar na resposta estrutural de um compósito laminado de matriz epóxida reforçado com fibras de vidro. Para tal, foram realizados ensaios de tração e de fadiga. Também foram realizadas medições das massas dos provetes ao longo dos 900 dias para avaliar a percentagem de massa de água absorvida nesse intervalo.

Neste capítulo será explicado o procedimento de medição da massa, dos ensaios de tração e de fadiga, bem como a descrição dos equipamentos utilizados, assim com os materiais que foram usados para os ensaios. Também será explicado o procedimento utilizado para medir os campos de deformação através do *software* VIC-3D, que acompanhou os ensaios de fadiga. Por fim, será explicado o processo utilizado para analisar os diferentes tipos de falhas que ocorreram na zona de fratura dos provetes.

3.1. Materiais utilizados

Para este estudo foram utilizadas amostras com tecido bidirecional de fibra de vidro, 1195P (195 g/m²), e uma resina epóxida Biresin® CR112 com endurecedor Biresin® CH112-3. A percentagem de endurecedor utilizado foi de cerca de 30% do peso da resina utilizada, como indicado pelo fornecedor [30].

As amostras foram produzidas com uma espessura de 2,3mm e são constituídas por 12 camadas. Foram todas produzidas e retificadas, numa fresadora, de forma que a sua área de secção fosse o mais idêntica possível [30].

A resina epóxida utilizada na produção das amostras, apresenta as seguintes propriedades, enumeradas na Tabela 3.1. Principais propriedades da resina utilizada na produção dos provetes [30].

Tabela 3.1. Principais propriedades da resina utilizada na produção dos provetes [30].

Propriedades	Resina Biresin® CR112 com endurecedor Biresin® CH112-3	Unidades
ρ	1170	[kg/m ³]
σ_R	84	[MPa]
E	2800	[MPa]
ε	5,8	[%]
Resistência à flexão	129	[MPa]
Resistência ao impacto	47	[kJ/m ²]
T_g	114	[°C]

A partir das amostras foram seccionados provetes, com dimensões de 165x22,5 [mm²] os quais apresentam um furo central, de 5 mm. Aquando da realização do furo tentou-se garantir que todos eles ficariam idênticos. O furo foi realizado com recurso a uma broca. Primeiro realizou-se um pequeno furo com uma broca mais fina e depois utilizou-se uma broca de 5mm para acabamento do furo [30].

3.1.1. Geometria dos provetes utilizadas nos ensaios

Os provetes utilizados ao longo de todo o procedimento experimental são, de acordo com o já referido, todos idênticos e a sua geometria é retangular com um furo central, como mostra a Figura 3.1.



Figura 3.1. Provetes utilizados durante todo o procedimento experimental.

Na Figura 3.2, está representado um esquema dos provetes, com as respetivas dimensões. Os provetes apresentam um comprimento, l , de 165 mm, uma largura, w , de 22,5 mm e uma espessura, t , de 2,3 mm. O furo central apresenta um diâmetro, d , de 5 mm.

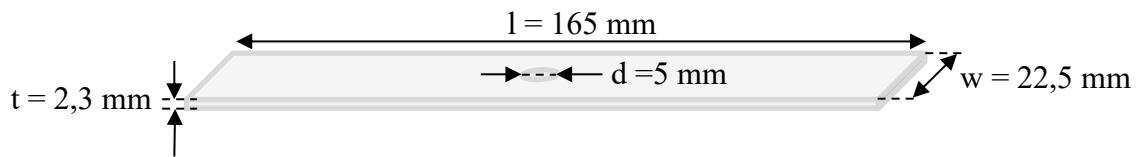


Figura 3.2. Dimensões dos provetes utilizados

O furo central foi introduzido nos provetes para que seja criada uma concentração de tensões nessa região, provocando assim a ocorrência de fratura dos provetes nessa região, tanto nos ensaios de tração com de fadiga e evitando assim que a fratura ocorra junto das amarras.

3.2. Medição da massa dos provetes após imersão

Ao longo dos 900 dias de imersão foram efetuadas algumas medições das massas de 4 provetes, sempre os mesmos, com recurso a uma balança digital da marca AND modelo GH-202, que efetua medições com precisão até à décima de micrograma. A balança utilizada neste processo está representada na Figura 3.3.



Figura 3.3. Balança digital da marca AND modelo GH-202.

O processo de medição utilizado foi sempre o mesmo, os provetes eram retirados da água do mar, secos com uma toalha, efetuava-se a respetiva medição e anotação da massa de cada um e, por fim, estes voltavam a ser colocados na água do mar. Este processo repetia-se a cada medição efetuada.

3.3. Ensaaios

Durante o estudo foram ensaiados 21 provetes que estiveram imersos 900 dias em água do mar. Desse lote de provetes, 3 foram ensaiados à tração, para estudar a influência da água do mar na resistência à tração do material. Os restantes 18 provetes foram ensaiados à fadiga, onde 9 provetes não apresentavam pré-tensão e outros 9 provetes apresentavam pré-tensão, sendo 3 sujeitos a uma pré-tensão de 25%, 3 de 50% e outros 3 de 75% do valor máximo da tensão de rotura. O valor máximo da tensão de rotura foi obtido através de ensaios de tração, previamente realizados, de provetes que não sofreram imersão em água do mar, sendo estes designados por provetes de controlo.

Na Figura 3.4, é apresentado um esquema geral de todos os ensaios à fadiga efetuados.

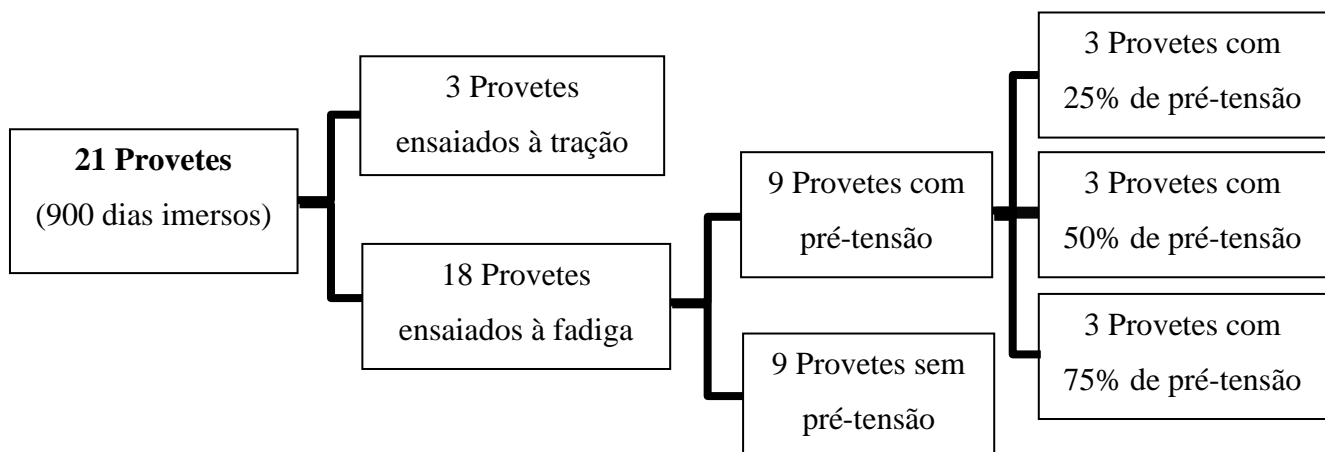


Figura 3.4. Esquema dos ensaios realizados.

3.3.1. Ensaaios à tração

Foram realizados três ensaios estáticos de tração uniaxial, em provetes com 900 dias de imersão em água do mar, com o objetivo, conforme mencionado anteriormente, de avaliar a variação da resistência à tração do material.

Os ensaios de tração foram efetuados com recurso a um equipamento universal de tração SHIMADZU Autograph AGS-X, com capacidade de carga máxima de 100 kN, associada a um software TRAPEZIUM X, para processamento de dados, na Figura 3.5.



Figura 3.5. Equipamento universal SHIMADZU Autograph AGS-X.

Durante todos os ensaios a velocidade de ensaio utilizada foi sempre de 5 mm/min. A distância entre as amarras também foi mantida constante durante todos os ensaios, sempre 100 mm. Após os provetes serem devidamente preparados, foram colocadas no equipamento e as amarras foram corretamente apertadas garantindo sempre a distância estipulada entre elas.

Para a realização dos ensaios foi necessário medir as dimensões precisas dos provetes. As dimensões encontram-se na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Dimensões exatas dos provetes ensaiados à tração.

Provete	w [mm]	t [mm]	d [mm]	A [mm ²]
1	22,41	2,28	5	39,69
2	22,59	2,32	5	40,81
3	22,52	2,41	5	42,22

No fim de cada ensaio, com recurso ao programa EXCEL, foram tratados e analisados os dados recolhidos.

Os valores obtidos nos ensaios de tração, para os provetes com 900 dias de imersão, foram comparados com os valores obtidos nos ensaios à tração dos provetes de controlo, obtidos num trabalho anterior [30]. Assim, já é possível retirar algumas conclusões

relativamente ao efeito da água do mar, no comportamento à tração do material laminado vidro/epóxico.

3.3.2. Ensaios à fadiga

Foram realizados 18 ensaios à fadiga, em provetes com 900 dias de imersão em água do mar, com o objetivo de obter as curvas S-N para o material em estudo. Sendo que 9 provetes apresentavam pré-tensão, como anteriormente já foi referido.

Os ensaios de fadiga foram realizados utilizando uma máquina servo-hidráulica INSTRON 134, com capacidade de carga máxima de 100 kN. Estes ensaios decorreram a amplitude de tensão constante. É possível observar a máquina onde foram realizados os ensaios de fadiga, na Figura 3.6.



Figura 3.6. Máquina servo-hidráulica INSTRON 134 com as câmaras do *software* VIC-3D incorporadas.

O espectro de carga utilizado apresentava a forma de uma onda sinusoidal com uma razão de tensões, R , de 0,1. Foi utilizada uma frequência de 10 Hz. Quando se realizam ensaios de fadiga em compósitos, não é aconselhável utilizar valores de frequência muito elevados, porque promove o aumento de temperatura do material, acabando por alterar as propriedades dos provetes e, conseqüentemente, os resultados dos ensaios [4][31].

Para realizar os ensaios, foi necessário definir alguns parâmetros característicos dos ensaios de fadiga, nomeadamente a força média, F_m , e a força alternada, F_a . Estas forças podem ser calculadas pela Equação (3.1) e pela Equação (3.2), respetivamente. Representando $F_{m\acute{a}x}$ a força máxima e $F_{m\acute{i}n}$ força mínima.

$$F_m = \frac{F_{m\acute{a}x} + F_{m\acute{i}n}}{2} \quad (3.1)$$

$$F_a = F_{m\acute{a}x} - F_m \quad (3.2)$$

Em cada ensaio, foi definido um valor para a força máxima, sendo assim possível obter os parâmetros necessários (força média e força alternada). A força mínima é obtida em função da razão de tensões, obtida pela Equação (3.3).

$$F_{m\acute{i}n} = R \times F_{m\acute{a}x} \quad (3.3)$$

Para cada ensaio o provete foi colocado entre as duas amarras hidráulicas, nas devidas posições. Em seguida, recorrendo ao *software* SAX, foi necessário definir alguns parâmetros para dar início aos ensaios, tais como, a frequência do ensaio, força média e força alternada.

Nos ensaios foram utilizados três níveis de tensão alternada, com o objetivo de facilitar a construção das curvas S-N e assim melhorar a análise de resultados e a obtenção de conclusões. Os valores padrões utilizados foram então: $\sigma_a = 45,64$ MPa; $\sigma_a = 52,60$ MPa; $\sigma_a = 61,60$ MPa. Para cada um destes três níveis de carga foram ensaiados três provetes.

Na Tabela 3.3, são apresentados os dados mais relevantes para cada ensaio à fadiga, tais como as dimensões de cada um dos provetes, as cargas aplicadas e as respetivas tensões. Os dados apresentados são referentes aos provetes com 900 dias de imersão em água do mar, com e sem pré-tensão.

Tabela 3.3. Dados utilizados na realização dos ensaios à fadiga.

Provete	Pré-tensão	w [mm]	t [mm]	d [mm]	F_m [kN]	F_a [kN]	σ_a [MPa]	σ_m [MPa]
1	-	22,47	2,30	5	2,585	2,115	52,64	64,33
2	-	22,47	2,30	5	3,025	2,475	61,60	75,28
3	-	22,47	2,30	5	3,025	2,475	61,60	75,28
4	-	22,47	2,30	5	2,241	1,834	45,64	55,78
5	-	22,47	2,30	5	3,025	2,475	61,60	75,28
6	-	22,40	2,35	5	2,629	2,151	52,60	64,29
7	-	22,40	2,37	5	3,109	2,544	61,60	75,29
8	-	22,47	2,36	5	2,297	1,879	45,64	55,78
9	-	22,48	2,27	5	2,553	2,088	52,64	64,34
10	25%	22,47	2,30	5	3,025	2,475	61,60	75,28
11	25%	22,50	2,11	5	3,025	2,475	67,03	81,92
12	25%	22,39	2,24	5	2,933	2,399	61,60	75,28
13	50%	22,44	2,33	5	3,060	2,503	61,61	75,30
14	50%	22,52	2,45	5	3,232	2,644	61,60	75,29
15	50%	22,46	2,17	5	2,853	2,334	61,61	75,30
16	75%	22,40	2,13	5	2,790	2,283	61,60	75,28
17	75%	22,44	2,03	5	2,665	2,181	61,60	75,28
18	75%	22,44	2,21	5	2,902	2,374	61,60	75,29

Todas os provetes foram ensaiados até à rotura. No fim de cada ensaio foi registado o número de ciclos de vida que cada um efetuou até ocorrer rotura. Com recurso às ferramentas do EXCEL, através das tensões e do número de ciclos, foi possível organizar os dados obtidos e construir a curva S-N deste material, para 900 dias de imersão em água do mar.

3.4. Extensometria ótica

Os ensaios de fadiga foram acompanhados por extensometria ótica, por recurso ao *software* VIC-3D. Este é um *software* com um sistema avançado de correlação digital de imagem (DIC), é usado para obter os campos de deformações dos provetes e analisar os detalhes ao longo do processo de fratura dos mesmos.

Para utilizar este *software* corretamente foi necessário associar-lhe duas câmaras fotográficas estáticas devidamente calibradas, como é mostrado na Figura 3.6. As câmaras permitiram tirar fotografias aos provetes em ensaio ao longo de todo o ciclo de fadiga, e devido ao sistema de correlação digital de imagem associado ao *software*, foi possível obter os campos de deformações em cada fotografia e assim obter as deformações ao longo do ciclo de vida até à rotura. Esta avaliação foi efetuada periodicamente com intervalos que variaram, aproximadamente, entre 2500 e 10 000 ciclos.

Para ser possível a captação das imagens por recurso ao método DIC, foi aplicado sobre os provetes um revestimento de tinta branca que, seguidamente, foi pulverizada com tinta preta por forma a produzir um padrão aleatório de alto contraste sobre os provetes, habitualmente designado por *speckle*, Figura 3.7. Este procedimento permite que as duas câmaras, que constam do equipamento DIC, numa posição estereoscópica, consigam rastrear e analisar os padrões de manchas de tinta preta na superfície dos modelos.



Figura 3.7. Amostras após pintura, com padrão *speckle*.

3.5. Mecanismos de falha

Depois de realizados os ensaios de tração e de fadiga, para analisar e avaliar os tipos de falha que possam ter ocorrido nos provetes, foi necessário observar as zonas de fratura com recurso à Lupa ZEISS Stemi 2000-C. A lupa utilizada é a representada na Figura 3.8.



Figura 3.8. Lupa ZEISS Stemi 2000-C.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos neste trabalho, relativamente à medição da variação de massa, aos ensaios de tração e de fadiga dos provetes descritos no Capítulo 3.

O principal objetivo é avaliar quais os efeitos que o tempo de imersão em água do mar provoca nas propriedades mecânicas, bem como na vida do compósito laminado epóxico/vidro.

4.1. Absorção da água do mar

A absorção de água é uma das causas para a diminuição da resistência mecânica dos materiais compósitos. É muito importante avaliar a percentagem de água absorvida pelo material e garantir que o material continua capaz de desempenhar as funções para a qual foi projetado. Os provetes ao estarem imersos em água do mar, é expectável que apresentem um aumento da massa, devido ao efeito de absorção.

Para avaliar a percentagem de absorção de água, foram efetuadas medições da massa, sempre dos mesmos quatro provetes, ao longo dos 900 dias de imersão. A percentagem de água absorvida é obtida pela Equação (4.1).

$$\% \text{ de água absorvida} = \frac{m_{X \text{ dias de imersão}} - m_0 \text{ dias de imersão}}{m_0 \text{ dias de imersão}} \times 100 \quad (4.1)$$

As massas de todos os provetes foram devidamente obtidas com recurso a uma balança de elevada precisão. Os valores das medições para 229 dias e para 900 dias de imersão, são os apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Massa dos provetes para diferentes tempos de imersão.

Provete	m 0 dias de imersão [g]	m 229 dias de imersão [g]	m 900 dias de imersão [g]
1	14,1457	14,2452	14,2997
2	13,4776	13,5640	13,6162
3	13,8791	13,9728	14,0302
4	13,4377	13,5186	13,5684

Na Tabela 4.2, é apresentada as percentagem de água do mar absorvida, relativamente à massa da inicial do provete (com 0 dias de imersão), após 229 dias e 900 dias.

Tabela 4.2. Percentagem de água absorvida pelos provetes após 229 dias e 900 dias.

Provete	[%] (229 dias)	[%] (900 dias)
1	0,703	1,089
2	0,641	1,028
3	0,675	1,089
4	0,602	0,973

Pela Tabela 4.2, retira-se que a percentagem de água do mar absorvida, relativamente à massa inicial do provete, após 229 dias varia entre 0,6 e 0,7% e após 990 dias de imersão, é cerca de 1%.

Na Figura 4.1, está representado um gráfico de barras que mostra de uma forma mais visual os valores finais da Tabela 4.2.

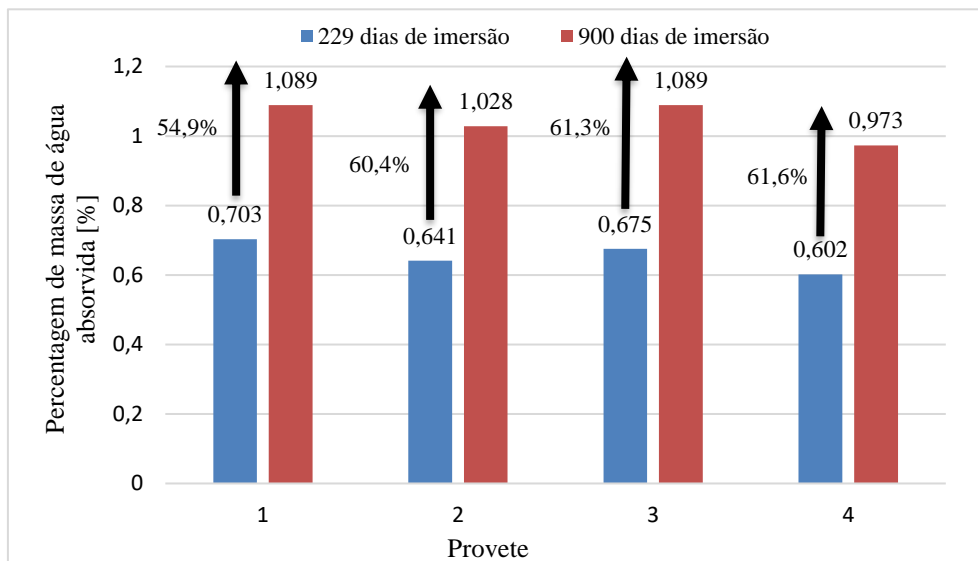


Figura 4.1. Percentagem de massa de água absorvida pelos provetes para dois tempos de imersão diferentes

Pela Figura 4.1, verifica-se que houve um aumento relativo de massa de água absorvida, a variar entre os 55% e os 62%, dos provetes com 229 dias de imersão para os provetes com 900 dias de imersão.

Como já foi referido, desde o momento que os provetes foram imersos, foram realizadas algumas medições da sua massa ao longo do tempo. Através dessas medições foi possível construir o gráfico da Figura 4.2, que representa a percentagem em massa de água absorvida (média dos 4 provetes), em função do tempo do tempo de imersão.

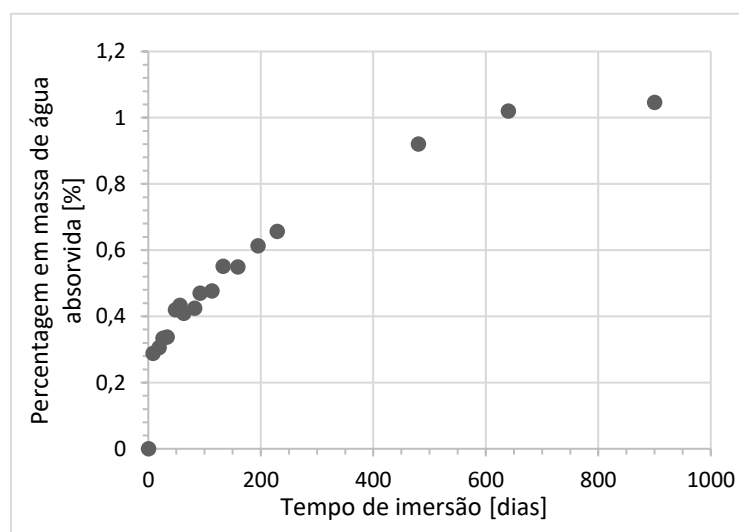


Figura 4.2. Registo da percentagem em massa de água absorvida ao longo dos 900 dias de imersão.

Pelo gráfico da Figura 4.2, é possível observar que a curva nos últimos registos tende a estabilizar, isto significa que a massa máxima de água que o material pode absorver deve estar muito próximo do valor da massa de água absorvida registada para os 900 dias de imersão.

4.2. Ensaios de tração

Através de ensaios à tração é possível obter diversas propriedades do material, como, resistência à tração, módulo de elasticidade ou módulo de Young e a deformação de rotura.

Com o objetivo de analisar a variação da resistência à tração do material, foram realizados três ensaios à tração em provetes com 900 dias de imersão e estes resultados foram comparados com os resultados para provetes que não foram sujeitos a imersão em água do mar.

Ao realizar os ensaios de tração, e com recurso ao *software* TRAPEZIUM X foi possível reunir alguma informação, como, valores máximos da força, F , deslocamento, δ , tensão, σ , e deformação, ϵ , a que cada provete esteve sujeito. A informação obtida está apresentada na Tabela 4.3 e na Tabela 4.4.

Para os provetes de controlo, não sujeitos a imersão em água do mar, os dados obtidos nos ensaios de tração são os apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Valores obtidos nos ensaios à tração para provetes de controlo.

Provete	$F_{\text{máx}}$ [N]	$\delta_{\text{máx}}$ [mm]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{máx}}$ [-]
N1	8969	2,87	222,31	0,0287
N2	9545	3,19	242,91	0,0319
N3	9155	2,33	239,15	0,0233

Com os valores da tensão máxima de cada ensaio, para os provetes de controlo, obteve-se um valor médio para a resistência à tração, σ_R , do compósito laminado em estudo de 234,79 MPa com um desvio padrão de 10,97 MPa.

Para os provetes sujeitos a 900 dias de imersão em água do mar, os dados obtidos nos ensaios de tração são os apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Valores obtidos nos ensaios à tração para provetes com 900 dias de imersão.

Provete	F_{máx} [N]	δ_{máx} [mm]	σ_{máx} [MPa]	ε_{máx} [-]
N1	8381	2,69	211,13	0,0269
N2	7565	1,35	185,42	0,0135
N3	7477	2,16	177,09	0,0216

Com os valores da tensão máxima de cada ensaio, para os provetes com 900 dias de imersão, obteve-se um valor médio para a resistência à tração, σ_R , do compósito laminado em estudo de 191,21 MPa com um desvio padrão de 17,75 MPa.

Após obtidos e comparados os resultados, é de notar que houve uma redução na resistência à tração, em função do tempo de imersão na água do mar. A percentagem de redução de resistência pode ser calculada com recurso à Equação (4.2).

$$\frac{\sigma_{R,controle} - \sigma_{R,900 \text{ dias}}}{\sigma_{R,controle}} \times 100 [\%] \quad (4.2)$$

Na Tabela 4.5, está apresentado de uma forma resumida os resultados obtidos através dos ensaios de tração, de forma a avaliar a redução de resistência à tração do material compósito em estudo, quando imerso longos períodos em água do mar.

Tabela 4.5. Percentagem de redução de resistência à tração, dos provetes de controlo para os provetes com 900 dias de imersão.

	Controlo	900 dias de imersão	Redução [%]
Resistência à tração [MPa]	234,79	191,21	18,56

Com os dados adquiridos pelo *software* TRAPEZIUM X e depois devidamente tratados, foi possível construir o gráfico da Figura 4.3 para comparar a curva de tensão-deslocamento de um provete de controlo (N3) com a de um provete com 900 dias de imersão (N3).

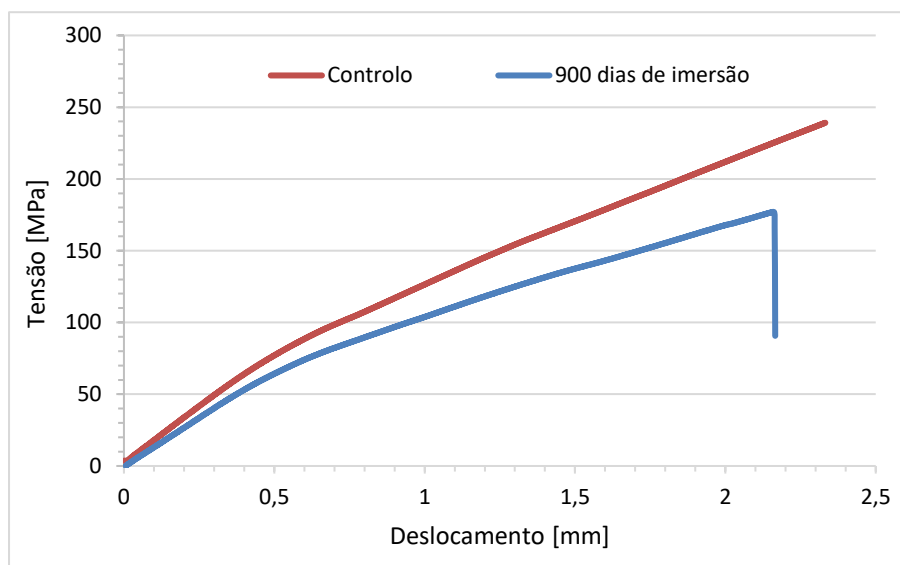


Figura 4.3. Efeito do tempo de imersão nas curvas à tração.

Pela análise da Figura 4.3, também é possível observar que ocorreu uma pequena redução do módulo de Young, dos provetes sem imersão para os provetes com 900 dias de imersão, porque o declive para a curva dos provetes com 900 dias de imersão é inferior ao declive da curva dos provetes de controlo.

4.3. Ensaios de fadiga em provetes sem pré-tensão

Com este subcapítulo, o objetivo é tratar e analisar os valores obtidos nos ensaios de fadiga, para provetes com 900 dias de imersão, comparar com os valores já obtidos, numa dissertação anterior, para tempos de imersão inferiores, e verificar se a água do mar tem influência nas propriedades mecânicas e de fadiga do compósito laminado de epóxico/vidro.

Com a realização dos ensaios de fadiga o principal objetivo é analisar e comparar as curvas S-N para provetes de controlo, provetes imersos 229 (com e sem pré-tensão) e provetes imersos 900 dias (com e sem pré-tensão).

As curvas S-N foram obtidas a partir da tensão alternada em função do número de ciclos até a rotura do material. Depois de realizados todos os ensaios, foi possível construir a Tabela 4.6, onde são apresentados os números de ciclos até à rotura, para os provetes de controlo, imersos 229 dias e imersos 900 dias, sem pré-tensão.

Tabela 4.6. Número de ciclos de vida até à rotura obtidos nos ensaios à fadiga, para provetes com diferentes tempos de imersão e sem pré-tensão; [*] Valores retirados de uma dissertação anterior [30].

Provete	σ_a [MPa]	σ_m [MPa]	N_R
<u>Provetes de controlo, sem pré-tensão [*]</u>			
N1	54,60	66,73	422245
N2	54,60	66,73	412341
N3	61,60	75,28	121935
N4	54,60	66,73	294177
N5	61,60	75,28	25034
N6	70,56	86,23	13758
N7	70,56	86,23	27874
N8	70,56	86,23	6831
N9	61,60	75,28	44800
<u>Provetes com 229 dias de imersão, sem pré-tensão [*]</u>			
N1	61,60	75,28	30804
N2	61,60	75,28	143463
N3	61,60	75,28	52168
N4	54,60	66,73	627895
N5	54,60	66,73	449198
N6	66,64	81,45	24015
<u>Provetes com 900 dias de imersão, sem pré-tensão</u>			
N1	52,64	64,33	120555
N2	61,60	75,28	22624
N3	61,60	75,28	6459
N4	45,64	55,78	1145839
N5	61,60	75,28	6047
N6	52,64	64,33	199556
N7	61,60	75,28	27727
N8	45,64	55,78	532316
N9	52,64	64,33	1125198

Com os dados da Tabela 4.6, foi possível obter a curva da tensão alternada em função do número de ciclos até à rotura, representada na Figura 4.4.

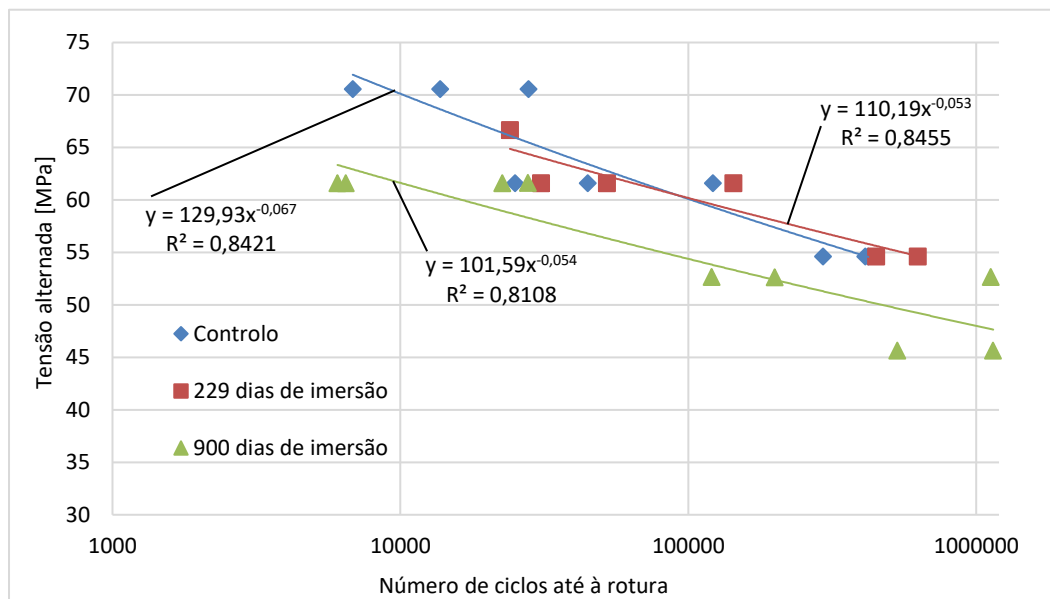


Figura 4.4. Curvas S-N para provetes com diferentes tempos de imersão e sem pré-tensão ($R=0,1$).

Todas as curvas apresentam um coeficiente de correlação, R^2 , semelhante, não é muito elevado, visto que o material em estudo é um compósito e este tipo de materiais apresenta resultados bastante dispersos. No entanto, ocorreu o que era esperado, os provetes com 900 dias de imersão apresentam uma curva com declive semelhante à curva dos provetes com 229 dias de imersão, mas para o mesmo número de ciclos apresentam tensões associadas mais reduzidas.

Pela interpretação do gráfico da Figura 4.4, significa que existe influência do tempo de imersão nas propriedades mecânicas do compósito laminado epóxico/vidro. Para um período mais longo de imersão, o material apresentou uma resistência à fadiga mais reduzida e assim uma conseqüente redução de vida à fadiga.

4.4. Ensaios de fadiga em provetes com pré-tensão

Na Tabela 4.7, são apresentados os dados relativos aos ensaios realizados para provetes que sofreram pré-tensão. Ao longo de todos os ensaios foi mantida constante a tensão alternada, fazendo somente variar os tempos de imersão com o objetivo de facilitar a comparação e a análise dos resultados.

Tabela 4.7. Valores obtidos para as vidas dos provetes nos ensaios à fadiga para os dois diferentes tempos de imersão; [*] Valores retirados de um dissertação anterior [30].

Provete	Pré-tensão	σ_a [MPa]	σ_m [MPa]	N_R	$N_{\text{médio}}$
Provetes com 229 dias de imersão, com pré-tensão [*]					
N1	25%	61,60	75,28	193484	87671
N2	25%	61,60	75,28	29185	
N3	25%	61,60	75,28	40344	
N4	50%	61,60	75,28	23195	62033
N5	50%	61,60	75,28	68173	
N6	50%	61,60	75,28	94733	
N7	75%	61,60	75,28	301479	147844
N8	75%	61,60	75,28	47153	
N9	75%	61,60	75,28	94901	
Provetes com 900 dias de imersão, com pré-tensão					
N1	25%	61,60	75,28	318475	213055
N2	25%	67,03	81,92	270389	
N3	25%	61,60	75,28	50302	
N4	50%	61,60	75,28	24989	25219
N5	50%	61,60	75,28	27629	
N6	50%	61,60	75,28	23039	
N7	75%	61,60	75,28	717099	371782
N8	75%	45,64	55,78	381847	
N9	75%	52,64	64,33	16402	

Com todos os valores dos ciclos de vida até à rotura, foi possível calcular o número médio de ciclos de vida até à rotura para provetes com 25%, 50% e 75% de pré-tensão para os dois diferentes tempos de imersão. Na Figura 4.5, está representado um gráfico onde é possível observar o número médio de ciclos até à rotura, para provetes com 229 dias e 900 dias de imersão.

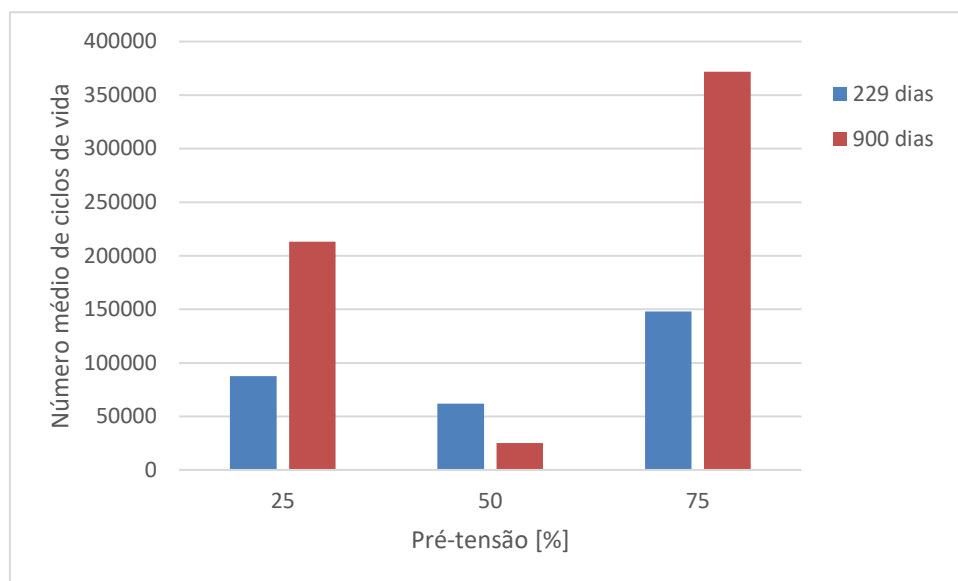


Figura 4.5. Número médio de ciclos de vida para os diferentes valores de pré-tensão e para os diferentes tempos de imersão.

Em análise da Figura 4.5, comparando os valores médios dos ciclos de vida entre provetes com 229 dias e 900 dias de imersão, observamos que somente nos provetes com 50% de pré-tensão é que ocorreu uma redução do número médio de ciclos até à rotura, com o aumento do tempo de imersão. Já para os provetes com 25% e 75% de pré-tensão, verificou-se o oposto, o aumento do tempo de imersão fez aumentar o número médio de ciclos de vida até à rotura. Também para os provetes com 25% e 75% de pré-tensão com 900 dias de imersão, os resultados mostram um número médio de ciclos de vida superior ao obtido para provetes com 50% de pré-tensão, como também já se tinha verificado para 229 dias de imersão.

Os resultados obtidos para os provetes com 25% e para 75% de pré-tensão não são coerentes com os resultados obtidos nas curvas S-N para os provetes sem pré-tensão. Através das curvas S-N foi possível concluir que um maior tempo de imersão provoca uma redução no número de ciclos de vida, o que não vai de encontro aos resultados obtidos para os ensaios dos provetes com 25% e 75% de pré-tensão.

4.5. Evolução de dano com base na rigidez do provete

Neste ponto será avaliada a evolução do dano que ocorreu nos provetes ao longo dos ensaios de fadiga. Este ponto será estudado através de curvas que dependem da rigidez do material, sendo esta dada pelo quociente entre a variação de carga, ΔP , e a variação do deslocamento, $\Delta\delta$, em função da razão do número de ciclos à fadiga, dada pelo quociente do número de ciclos, N , e o número de ciclos de vida até à rotura, N_R . Os dados para a construção das curvas foram obtidos através dos ficheiros gerados pelo *software* SAX para cada ensaio.

Na Figura 4.6, é apresentada a evolução de dano de três provetes, sem pré-tensão, que foram submetidos à mesma tensão alternada (61,60 MPa), sendo um de controlo (Provete N9), um com 229 dias de imersão (Provete N1) e um com 900 dias de imersão (Provete N5).

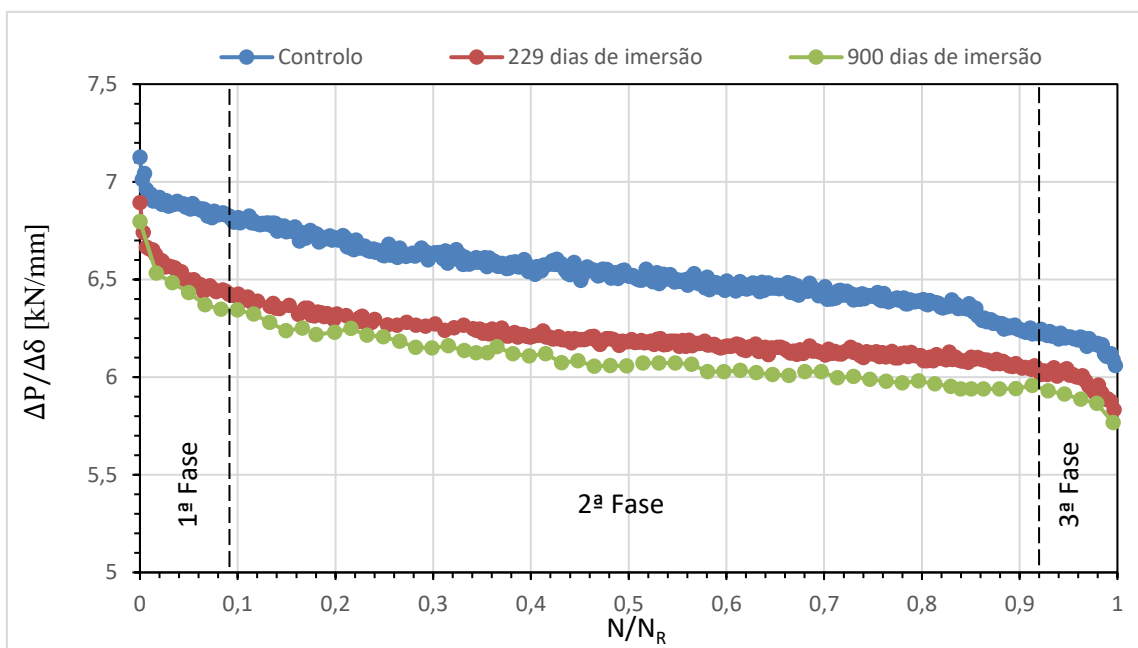


Figura 4.6. Evolução da rigidez em função do número de ciclos para os três diferentes tempos de imersão, com a mesma amplitude de tensão ($\sigma_a = 61,6$ MPa).

Com base na análise das curvas da Figura 4.6, é visível a existência de três fases distintas comuns para os três diferentes tempos de imersão. Na 1ª fase, durante os primeiros ciclos ao qual o material é sujeito, verifica-se uma redução muito acentuada da rigidez num curto número de ciclos de carga que está associada ao aparecimento de algumas fissuras na

matriz, separações entre as fibras e a matriz e à rotura de pequenas fibras. Na 2ª fase, dá-se também uma redução de rigidez, no entanto esta redução é muito menos acentuada devido ao facto de o aparecimento de fissuras e do número de rotura de fibras baixar bastante, em relação à fase anterior. Na 3ª fase, a que antecipa a rotura do material, observa-se novamente uma redução acentuada da rigidez devido ao facto da matriz e das fibras não apresentarem mais resistência às cargas cíclicas, acabando por ocorrer rotura progressiva, num curto número de ciclos, da totalidade das fibras e da matriz.

Para os diferentes tempos de imersão, é possível observar que as curvas da Figura 4.6 apresentam comportamentos muito idênticos. No entanto, à medida que o tempo de imersão aumenta, a 1ª fase parece estar associada a um declive crescente. Pelo contrário, na última fase, à medida que o tempo de imersão aumenta, a redução da rigidez parece ser menos expressiva.

Na Figura 4.7, é apresentada a evolução de dano de três provetes, com 900 dias de imersão, sem pré-tensão, mas agora para três níveis de carga diferentes. Para uma tensão alternada de 61,60 MPa foi utilizado o provete N2, para 52,60 MPa o provete N6 e para 45,60 MPa o provete N4.

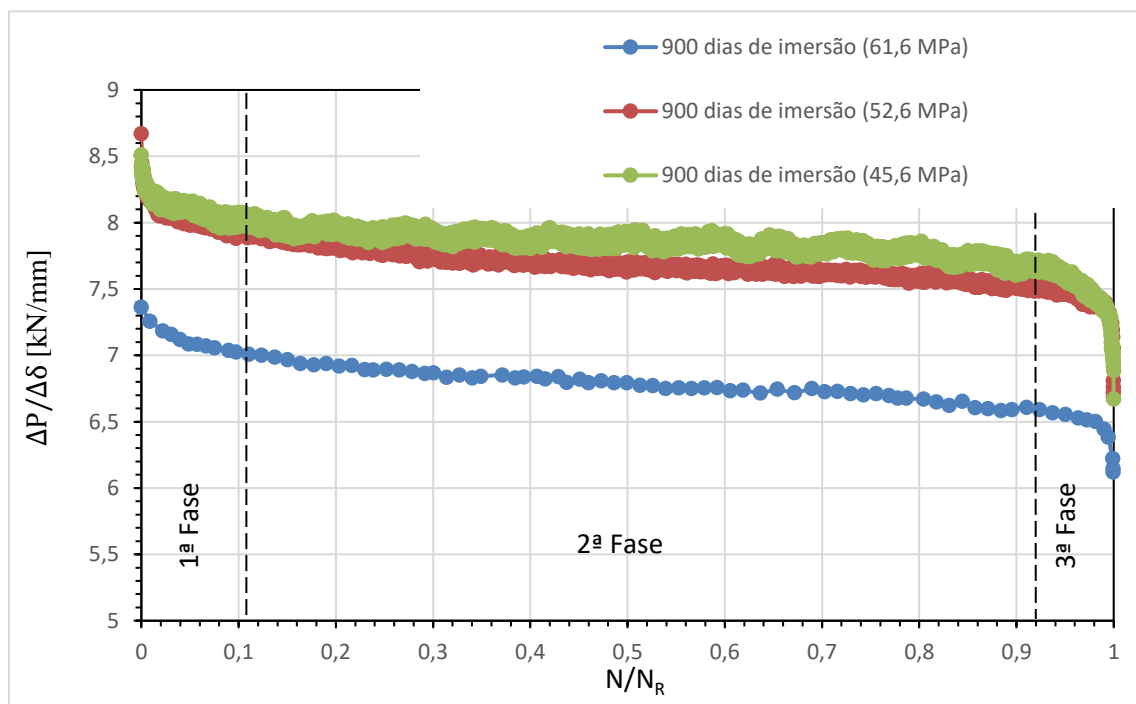


Figura 4.7. Evolução da rigidez em função do número de ciclos para os três níveis de carga diferentes, com o mesmo tempo de imersão (900 dias).

Pela análise do gráfico da Figura 4.7, verifica-se que as curvas para os três diferentes níveis de carga são muito semelhantes e todas elas apresentam três fases distintas em comum. Focando as atenções nas curvas com amplitude de tensão de 45,6MPa (a verde) e de 52,6MPa (a vermelho), é notório que para uma amplitude de tensão menor, o declive da fase intermédia, 2ª fase, é inferior, ou seja, ocorre menor variação de rigidez para uma amplitude de tensão menor.

Pela Figura 4.7, é possível observar que nem todos os provetes apresentam o mesmo valor de rigidez inicial, e que a evolução das curvas está, de certa forma, associada ao valor inicial de rigidez.

4.6. Evolução de dano através do método DIC

Neste ponto será também avaliada a evolução do dano que ocorre nos provetes ao longo dos ensaios de fadiga, mas agora com recurso às deformações obtidas pelo método de Correlação Digital de Imagem do *software* VIC-3D.

Através dos gráficos da Figura 4.8 e da Figura 4.9, é apresentada a razão da deformação que ocorre no material, sendo esta obtida através do quociente entre a deformação principal máxima, ϵ_1 , e a deformação principal máxima inicial, $\epsilon_{1, \text{inicial}}$, (deformação obtida sem ter ocorrido nenhum ciclo de carga de fadiga para uma carga estática correspondente ao valor máximo de carga aplicado no ensaio), em função da razão do número de ciclos à fadiga.

Na Figura 4.8, é apresentada a evolução de dano de três provetes sem pré-tensão, que foram submetidos à mesma tensão alternada (61,60 MPa), sendo um de controlo (Provete N3), um com 229 dias de imersão (Provete N2) e um com 900 dias de imersão (Provete N5).

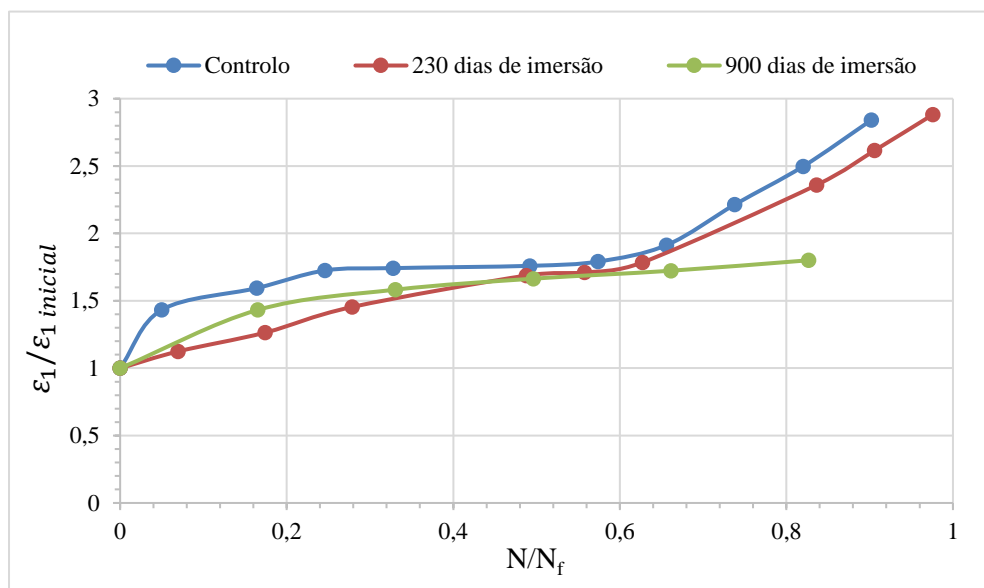


Figura 4.8. Evolução da razão $\epsilon_1/\epsilon_{1\text{ inicial}}$ em função do número de ciclos para os três diferentes tempos de imersão, com a mesmas amplitudes de tensão ($\sigma_a = 61,6 \text{ MPa}$).

É possível identificar ao longo das três curvas da Figura 4.8 três fases distintas. Numa fase inicial ocorre um grande aumento da deformação, uma fase intermédia onde se verifica pouca variação da deformação, mantendo-se a deformação constante durante muitos ciclos, e por fim, uma fase terminal onde se verifica novamente um grande aumento da deformação até ocorrer a rotura total do material.

Pela análise do gráfico da Figura 4.8, é possível concluir que o aumento do tempo de imersão faz diminuir a variação da razão das deformações. Isto é, para 900 dias de imersão, a razão entre a deformação que ocorre na fase final de vida do material e a deformação inicial do material é relativamente mais baixa do que aquela que se verifica para 229 dias de imersão e para 0 dias de imersão. Também é possível visualizar, pelo gráfico, que o provete de controlo apresenta uma fase intermédia onde ocorre muito pouca variação da deformação, isto é, o declive da fase intermédia da curva do provete de controlo é inferior ao declive da fase intermédia da curva do provete com 900 dias de imersão.

Na Figura 4.9, é também apresentada a evolução de dano de três provetes sem pré-tensão, mas agora para os três diferentes níveis de carga e com 900 dias de imersão. Para uma tensão alternada de 61,60 MPa foi utilizado o provete N2, para 52,60 MPa o provete N1 e para 45,60 MPa o provete N8.

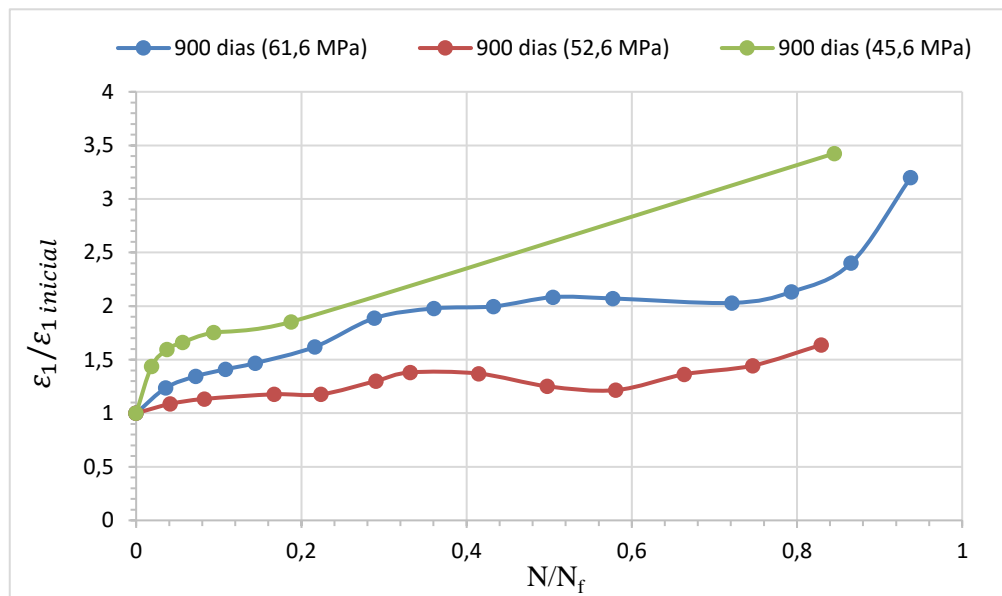


Figura 4.9. Evolução da razão $\varepsilon_1/\varepsilon_{1\text{ inicial}}$ em função do número de ciclos para os três níveis de carga diferentes, com o mesmo tempo de imersão (900 dias).

As curvas do gráfico da Figura 4.9, apresentam todas forma e comportamento muito idêntico e com valores muito próximos umas das outras, independentemente da carga aplicada em cada ensaio. Para $\sigma_a = 45,60$ MPa, não foi possível obter uma curva muito precisa, devido à falta de valores, no entanto, mesmo com os poucos valores adquiridos a curva não foge muito das restantes. Numa fase inicial apresentam um aumento acentuado de deformação, em seguida, numa fase intermédia ocorre pouca variação de deformação e, por fim, numa fase terminal, verifica-se novamente um aumento da deformação até ocorrer a rotura total do material.

4.7. Evolução de dano com base na análise das imagens obtidas pelo VIC-3D

Com este ponto, o principal objetivo é visualizar as imagens obtidas pelo *software* VIC-3D e analisar a evolução de dano através do campo de deformações, comparando os resultados dos diferentes tempos de imersão e das diferentes séries de carga.

Na Figura 4.10, na Figura 4.11 e na Figura 4.12, são apresentadas as imagens obtidas para um provete de controlo, um provete com 229 dias de imersão e um provete com 900 dias de imersão, respetivamente.

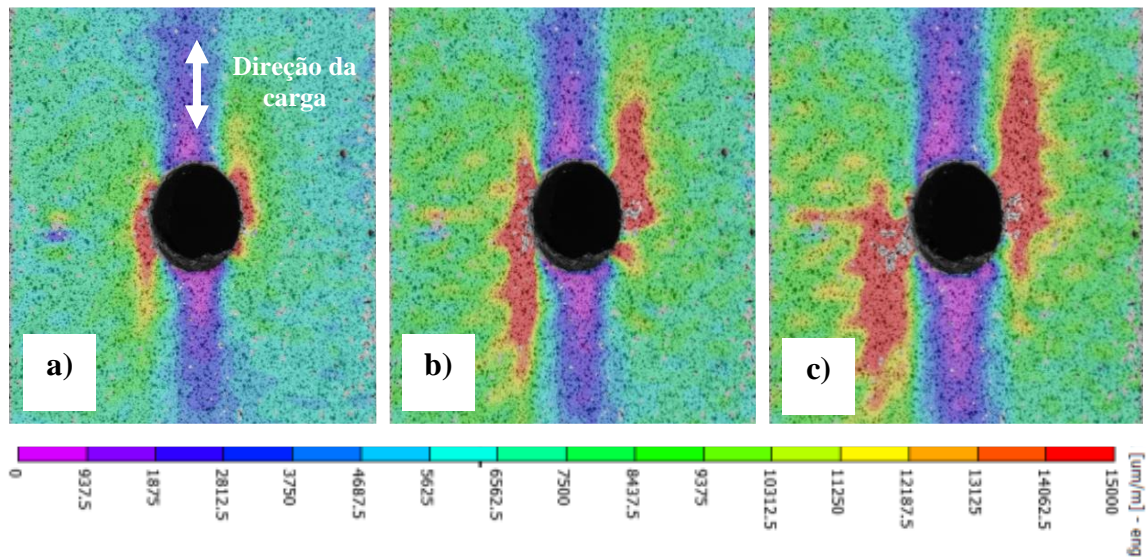


Figura 4.10. Evolução do campo da deformação principal, ϵ_1 , na proximidade do furo para um provete de controlo e sem pré-tensão (Provete N3): a) início do ensaio (0 ciclos); na fase intermédia do ensaio (12000 ciclos); e c) no último registo antes da rotura total do material (110000 ciclos) ($N_R=121935$).

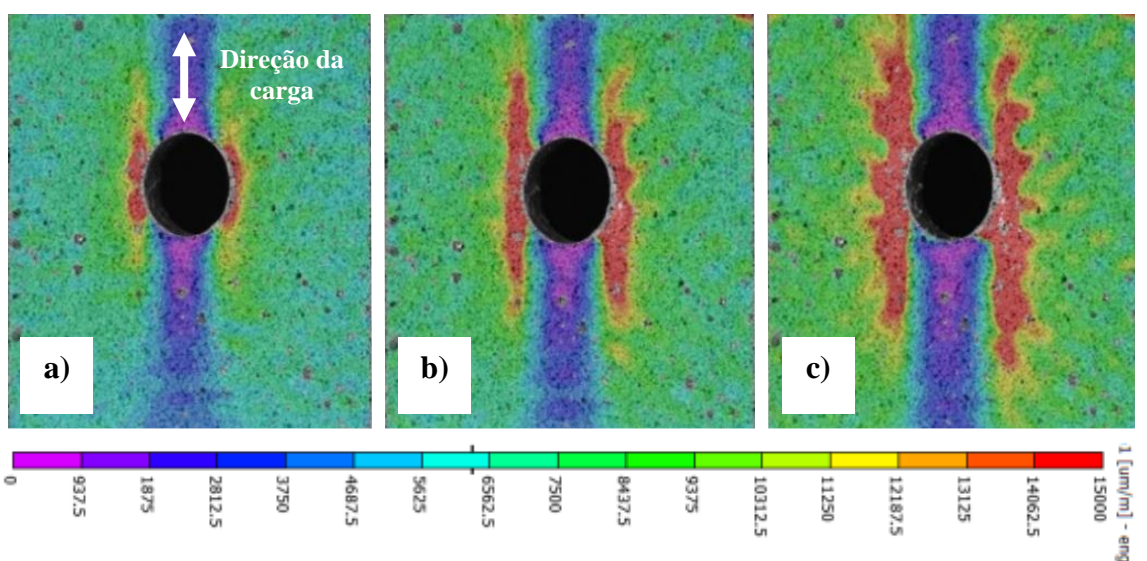


Figura 4.11. Evolução do campo da deformação principal, ϵ_1 , na proximidade do furo para um provete com 229 dias de imersão e sem pré-tensão (Provete N2): a) início do ensaio (0 ciclos); na fase intermédia do ensaio (40000 ciclos); e c) no último registo antes da rotura total do material (140000 ciclos) ($N_R=143463$).

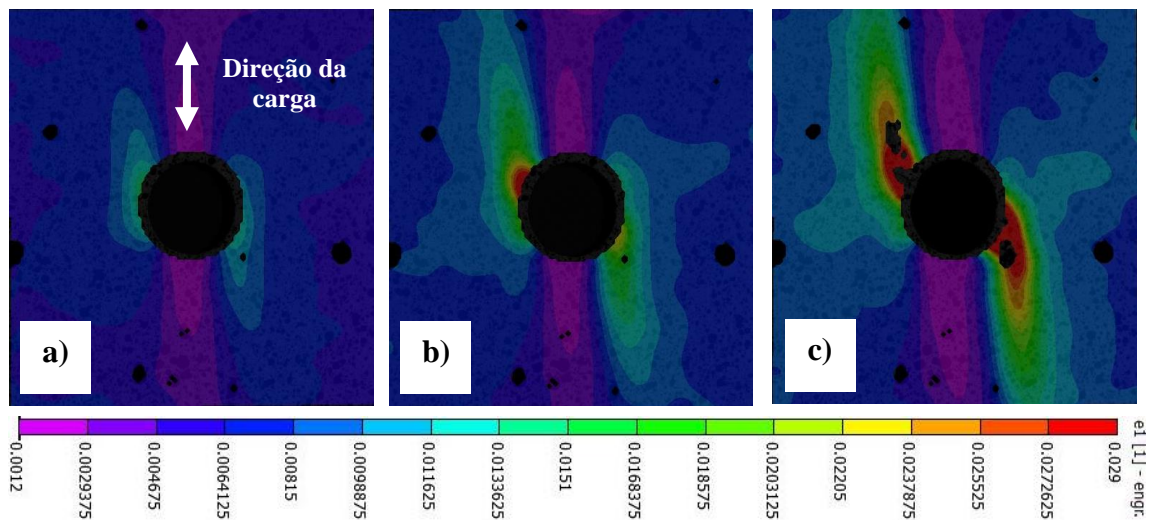


Figura 4.12. Evolução do campo da deformação principal, ϵ_1 , na proximidade do furo para um provete com 900 dias de imersão e sem pré-tensão (Provete N7): a) início do ensaio (0 ciclos); na fase intermédia do ensaio (10000 ciclos); e c) no último registo antes da rotura total do material (26000 ciclos) ($N_R=27727$).

Através das figuras anteriores e com recurso às respetivas escalas de cores, onde a cor vermelha representa a zona de maior deformação, é possível verificar que na zona mais próxima do furo é onde ocorrem as maiores deformações, isto acontece nos três diferentes tempos de imersão. Ao longo dos ciclos de carga é visível um aumento de área com cor vermelha, nas proximidades do furo, representando um aumento das zonas abrangidas pelos valores mais elevados da primeira deformação principal, criando zonas com maior acumulação de dano e, assim, possíveis zonas de rotura do material. Embora menos significativamente do que nestas zonas, as zonas mais distantes do furo também são afetadas quando se atinge um maior número de ciclos de carga, pela escala de cores, apresentam deformações na gama das cores verdes e amarelas.

Na Figura 4.13, na Figura 4.14 e na Figura 4.15, são apresentadas as imagens obtidas para os provetes com 900 dias de imersão com 25%, 50% e 75% de pré-tensão, respetivamente.

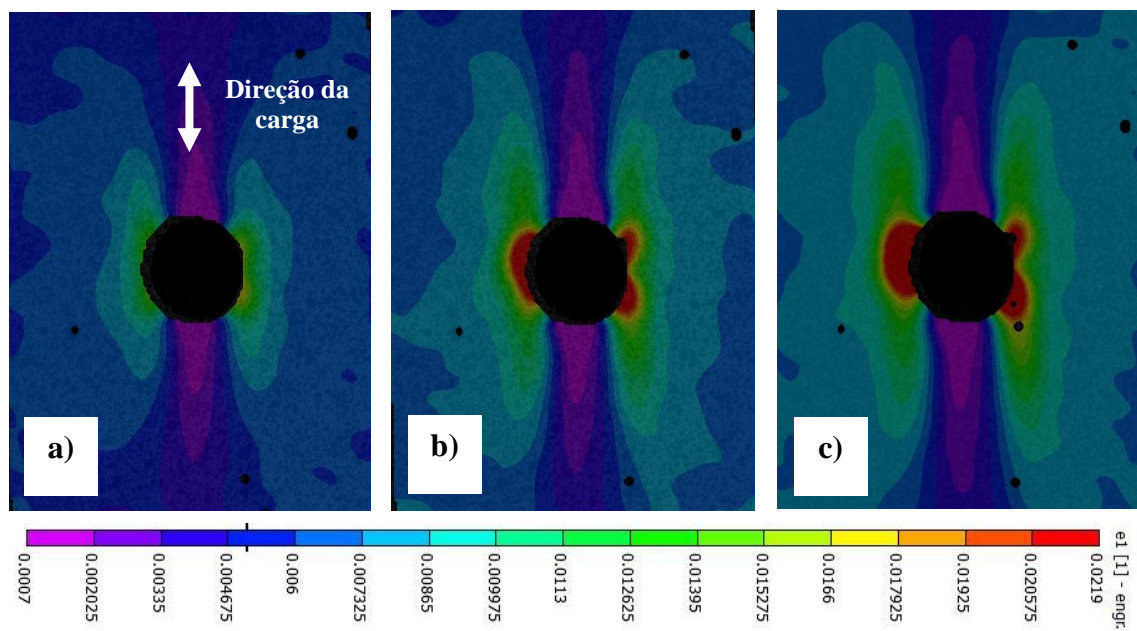


Figura 4.13. Evolução do campo da deformação principal, ϵ_1 , na proximidade do furo para um provete com 900 dias de imersão e com 25% de pré-tensão (Provete N1): a) início do ensaio (0 ciclos); na fase intermédia do ensaio (10000 ciclos); e c) no último registo antes da rotura total do material (205000 ciclos) ($N_R=318337$).

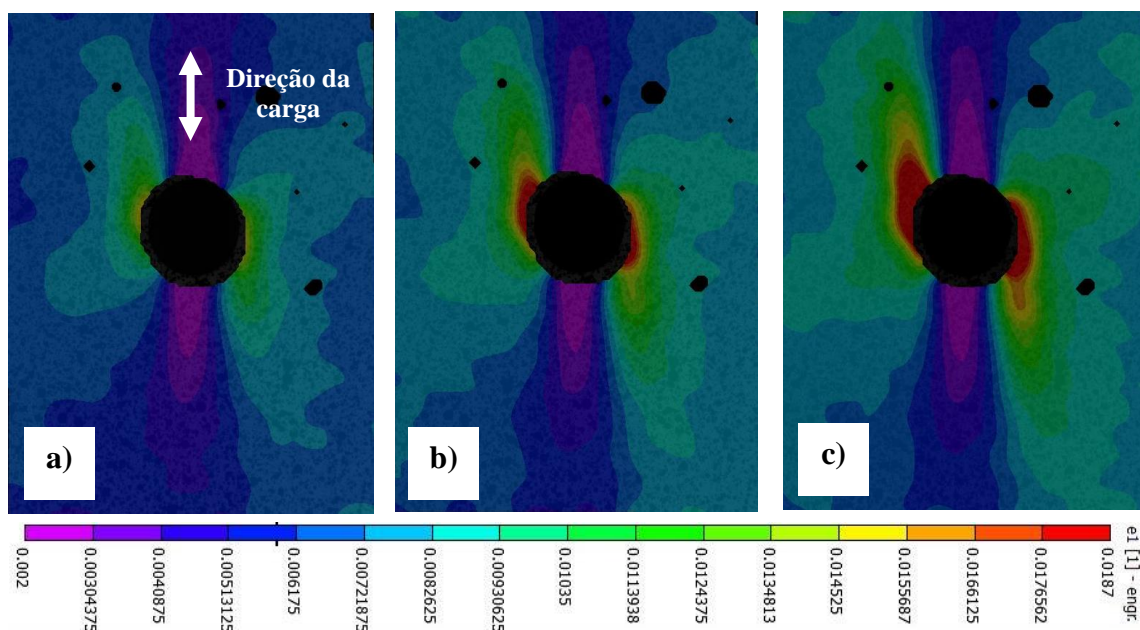


Figura 4.14. Evolução do campo da deformação principal, ϵ_1 , na proximidade do furo para um provete com 900 dias de imersão e com 50% de pré-tensão (Provete N4): a) início do ensaio (0 ciclos); na fase intermédia do ensaio (5000 ciclos); e c) no último registo antes da rotura total do material (20000 ciclos) ($N_R=24989$).

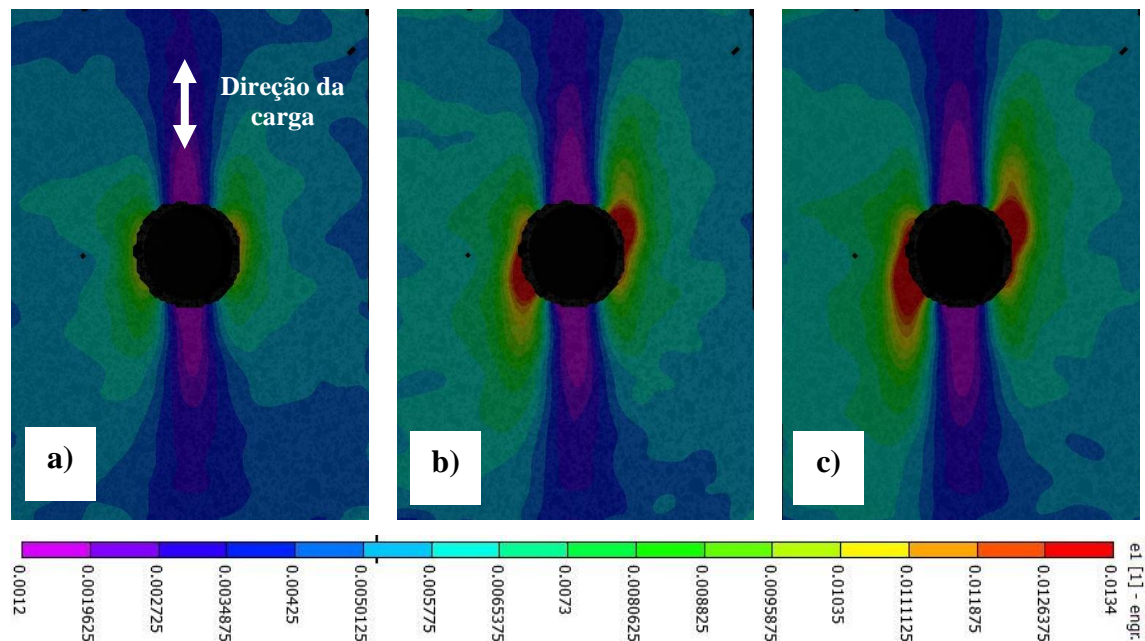


Figura 4.15. Evolução do campo da deformação principal, ϵ_1 , na proximidade do furo para um provete com 900 dias de imersão e com 75% de pré-tensão (Provete N8): a) início do ensaio (0 ciclos); na fase intermédia do ensaio (70000 ciclos); e c) no último registo antes da rotura total do material (140000 ciclos) ($N_R=381847$).

Os resultados obtidos para os provetes com pré-tensão são muito idênticos aos obtidos para os provetes sem pré-tensão, anteriormente observados. Entre os três diferentes níveis de carga verifica-se um comportamento muito semelhante, com o aumento do número de ciclos de carga, a área onde ocorrem os valores máximos da primeira deformação principal, definida pela cor vermelha na escala de cores, aumenta nas proximidades do furo, formando zonas com maior acumulação de dano, e que podem ser interpretadas como possíveis zonas de rotura do material. No entanto, no início dos ensaios (0 ciclos), quanto maior é o valor da pré-tensão, maior é a área preenchida pela cor amarela nas proximidades do furo, o que significa que devido à aplicação da pré-tensão já ocorreu alguma deformação junto ao furo e que esta é tanto maior quanto maior for o nível de pré-tensão.

4.8. Mecanismos de falha

Neste subcapítulo, são analisados os mecanismos de falha que levam à rotura total dos provetes, na zona do furo central. Em primeiro, são comparadas as zonas onde ocorre rotura do provete com as zonas das imagens fornecidas pelo *software* VIC-3D onde

se verifica maior deformação principal. Em segundo, são analisadas imagens obtidas à lupa com o intuito de avaliar e visualizar os diferentes tipos de danos presentes e que tiveram influência na rotura total do material.

Na Figura 4.16, na Figura 4.17, na Figura 4.18 e na Figura 4.19, são apresentadas as imagens do campo da deformação principal das amostras e as respetivas imagens após rotura dos provetes, para quatro provetes com 900 dias de imersão, um sem pré-tensão e um para cada nível de pré-carga, 25%, 50% e 75%, respetivamente.

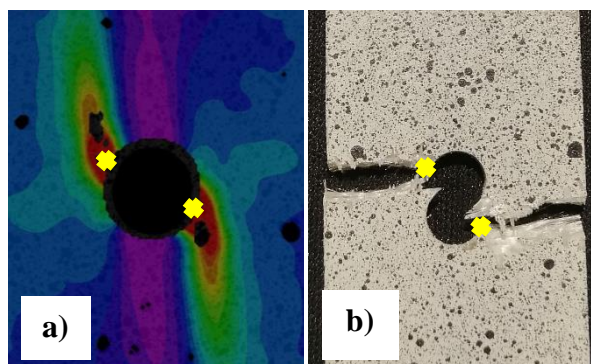


Figura 4.16. Comparação entre o local da deformação principal máxima e o local de rotura do provete com 900 dias de imersão e sem pré-tensão (Provete N7): a) último registo antes da rotura total do material (26000 ciclos); e b) após rotura do provete ($N_R=27727$).

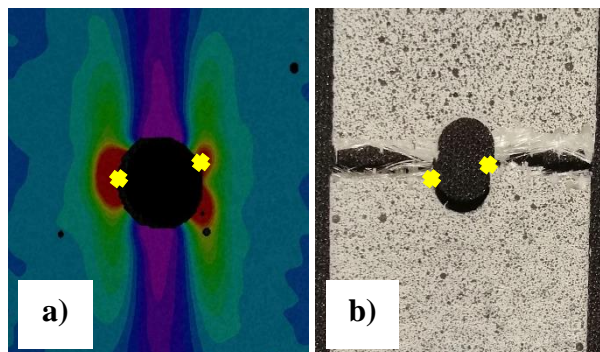


Figura 4.17. Comparação entre o local da deformação principal máxima e o local de rotura do provete com 900 dias de imersão e com 25% de pré-tensão (Provete N1): a) último registo antes da rotura total do material (205000 ciclos); e b) após rotura do provete ($N_R=318337$).

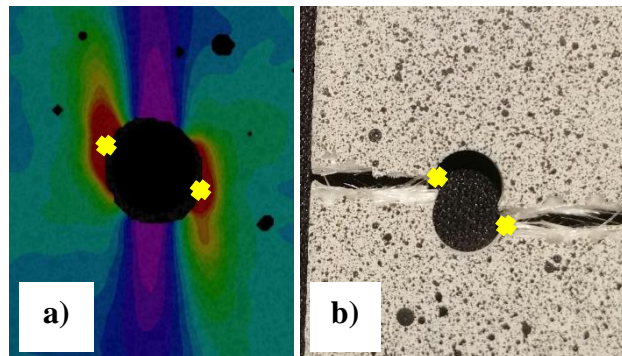


Figura 4.18. Comparação entre o local da deformação principal máxima e o local de rotura do provete com 900 dias de imersão e com 50% de pré-tensão (Provete N4): a) último registo antes da rotura total do material (20000 ciclos); e b) após rotura do provete ($N_R=24989$).

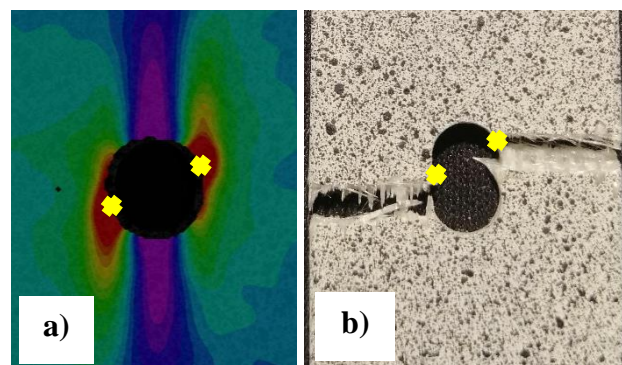


Figura 4.19. Comparação entre o local da deformação principal máxima e o local de rotura do provete com 900 dias de imersão e com 75% de pré-tensão (Provete N8): a) último registo antes da rotura total do material (140000 ciclos); e b) após rotura do provete ($N_R=381847$).

Na Figura 4.16, na Figura 4.17, na Figura 4.18 e na Figura 4.19, a cruz amarela pretende indicar o local onde se verifica o valor máximo da primeira deformação principal e que esta coincide com o local de rotura dos provetes. Sendo assim, através do acompanhamento dos ensaios à fadiga com o método de Corelação Digital de Imagem do *software* VIC-3D, pode-se obter informações sobre possíveis desenvolvimentos de fissuras e com o passar dos ciclos de carga é possível prever, com maior ou menor precisão, o local onde irá ocorrer rotura do provete.

Os danos que ocorrem com maior frequência nos compósitos laminados, são: delaminação, rotura da matriz, rotura das fibras e perda de coesão entre as fibras e a matriz, todos estes podem acabar por provocar falha estrutural do material. Através da análise das zonas de rotura dos provetes, com recurso à lupa, foram obtidas as imagens da Figura 4.20 e da Figura 4.21, onde é possível observar todos os tipos de dano anteriormente nomeados.

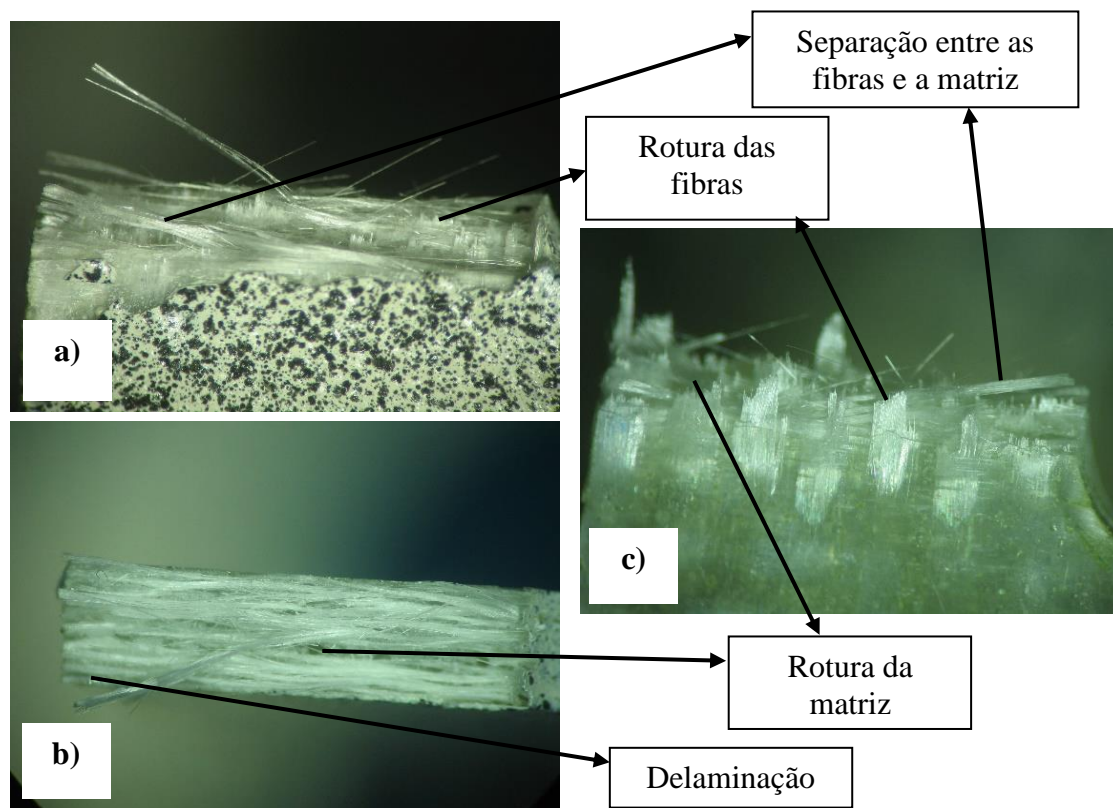


Figura 4.20. Diferentes tipos de dano observados à lupa: a) e b) provete com 900 dias de imersão e sem pré-tensão; c) provete com 900 dias de imersão ensaiado à tração.

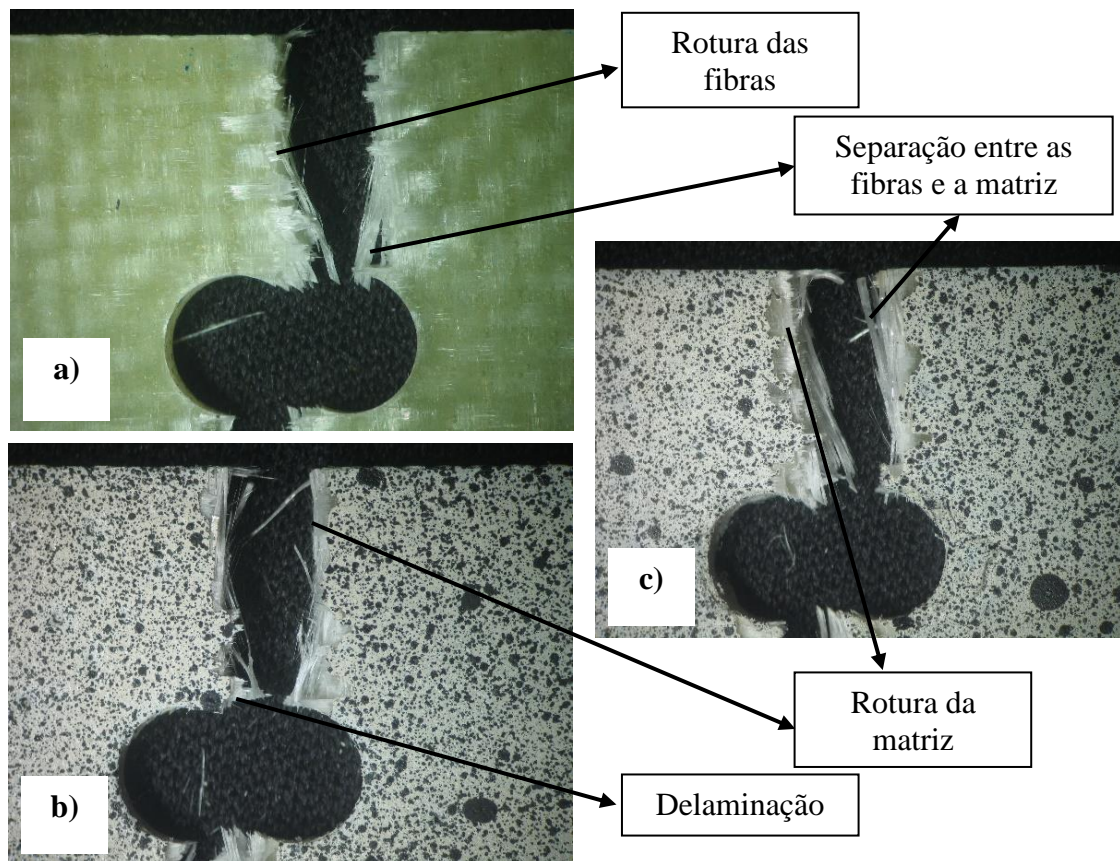


Figura 4.21. Diferentes tipos de dano observados à lupa: a) provete com 900 dias de imersão e com 25% de pré-tensão; b) provete com 900 dias de imersão e com 50% de pré-tensão; c) provete com 900 dias de imersão e com 75% de pré-tensão.

Pela observação das imagens da Figura 4.20 e da Figura 4.21, é possível identificar e verificar os tipos de dano mais comuns nos materiais compósitos laminados. Todos os provetes analisados à lupa estiveram 900 dias imersos em água do mar, e tanto os provetes ensaiados à tração como os ensaiados à fadiga (com e sem pré-tensão) apresentavam modos de falha e danos muito semelhantes. Em todos os provetes foi possível identificar os vários tipos de dano: delaminação, rotura da matriz, rotura das fibras e perda de coesão entre as fibras e a matriz.

5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas com a realização desta dissertação, após ter sido feita a discussão dos resultados. Também são feitas algumas propostas de melhoria para trabalhos futuros.

O principal objetivo deste estudo consistiu em avaliar o efeito que o tempo de imersão em água do mar provocou na resposta à fadiga em laminados vidro/epóxico.

Após a discussão dos resultados, é possível retirar as seguintes conclusões:

- I. Para 900 dias de imersão, verificou-se um aumento de cerca de 1% da massa dos provetes, devido ao efeito de absorção de água;
- II. Verificou-se que com 900 dias de imersão em água do mar os provetes estariam a atingir o seu ponto máximo de absorção de água;
- III. Os 900 dias de imersão em água do mar provocaram no material uma redução de cerca de 18% no valor de resistência à tração;
- IV. Para um período mais longo de imersão, de 900 dias, o material apresentou uma resistência à fadiga mais reduzida e assim uma consequente redução de vida à fadiga;
- V. Para os ensaios à fadiga realizados em provetes com pré-tensão, não foi possível retirar conclusões concretas, uma vez que os resultados não foram totalmente coerentes.
- VI. A evolução da rigidez em função do número de ciclos foi muito idêntica para os três tempos de imersão, todos apresentavam três fases distintas;
- VII. A evolução da rigidez em função do número de ciclos, para provetes com 900 dias de imersão, mas para os diferentes níveis de carga, também apresentou resultados muito semelhantes, embora se tenha observado menor variação de rigidez para os níveis de carga mais baixo;
- VIII. A evolução da razão entre a primeira deformação principal e o valor inicial da primeira deformação principal, tanto para diferentes tempos de imersão, como para diferentes níveis de carga, apresenta resultados

muito semelhantes, sendo também visível a presença de três fases distintas;

- IX. Pelo método DIC foi possível observar que a região onde ocorre o valor máximo da primeira deformação principal é junto ao furo central, segundo uma linha na direção perpendicular à carga que passa no centro do furo;
- X. Através do campo da primeira deformação principal é possível prever, com relativa precisão, o local de rotura dos provetes;
- XI. Os mecanismos de falha visíveis nas superfícies de fratura em praticamente todos os provetes, foram: rotura de fibras, rotura da matriz, delaminação e separação das fibras com a matriz.

5.1. Proposta para trabalhos futuros

Neste subcapítulo são apresentadas algumas propostas de melhoria para trabalhos futuros:

- I. Devido ao facto de o fenómeno de fadiga ser caracterizado por alguma dispersão, o que é ainda mais acentuado em materiais compósitos, sugere-se a realização de um maior número de ensaios para assim haver maior fiabilidade nos resultados obtidos;
- II. Sugere-se, também, a realizar ensaios em provetes com geometrias diferentes, incluindo geometrias com diferentes diâmetros de furo, e também sem furo central para poder avaliar-se melhor o efeito do furo na resistência à fadiga;
- III. Sugere-se, ainda, estudar tempos de imersão superiores, bem como o estudo do comportamento à fadiga para outras razões de tensão, incluindo carregamentos com amplitude variável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] H. Silva, “Comportamento mecânico de compósitos de fibra de vidro/epoxy nano-reforçados,” 2014, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10400.19/2635>.
- [2] K. Joseph, K. Oksman, G. George, R. Wilson, and S. Appukuttan, “Fiber Reinforced Composites,” Elsevier, 2021.
- [3] T. F. FERNANDES, “Preparação e caracterização de novos materiais compósitos baseados em fibras de celulose,” 2008.
- [4] G. Fesnandes, “Estudo do efeito de ambientes corrosivos em compósitos laminados de carbono-epóxi,” 2017.
- [5] A. Campos, “Estudo dos Efeitos Ambientais no Comportamento Mecânico de Materiais Compósitos,” 2012.
- [6] D. Afonso and L. Correia, “Estudo do efeito da percentagem de fibra na resistência à fadiga de compósitos de fibra curta carbono / epóxi,” 2017.
- [7] J. Pereira, “Desenvolvimento e fabrico de compósitos de matriz polimérica com fibras naturais,” 2017.
- [8] S. K. Mazumdar, *Composites Material Engineer and Science*. 2002.
- [9] F. L. Pires Leite, “Durabilidade de compósitos de matriz termoplástica / termoendurecível reforçada com fibras sintéticas e naturais,” 2017.
- [10] P. K. Mallick, *Processing of Polymer Matrix Composites*, 1^a Edition. CRC Press, 2017.
- [11] A. k. Kaw, *Mechanics of Composite Materials*, 2^a Edition. 2005.
- [12] Michael Ashby, *Seleção de Materiais no Projeto Mecânico*, vol. XXXIII, no. 2. 2012.
- [13] V. A. de F. Pessôa, “Reciclagem e reutilização de materiais poliméricos plásticos,” 2018.
- [14] N. Hu, *Composites and Their Applications*. 2012.
- [15] S. Mazumdar, *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*. 2001.
- [16] R. da S. Alves and M. M. Arouche, “Uso de compósitos em reparos na indústria

- naval e offshore,” *Rev. Científica Multidiscip. Núcleo do Conhecimento*, pp. 62–81, May 2020, doi: 10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-mecanica/industria-naval.
- [17] G. Huang and H. Sun, “Effect of water absorption on the mechanical properties of glass/polyester composites,” *Mater. Des.*, vol. 28, no. 5, pp. 1647–1650, 2007, doi: 10.1016/j.matdes.2006.03.014.
- [18] A. Kootsookos and A. P. Mouritz, “Seawater durability of glass- and carbon-polymer composites,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 64, no. 10–11, pp. 1503–1511, 2004, doi: 10.1016/j.compscitech.2003.10.019.
- [19] D. Olmos, R. López-Morón, and J. González-Benito, “The nature of the glass fibre surface and its effect in the water absorption of glass fibre/epoxy composites. The use of fluorescence to obtain information at the interface,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 66, no. 15, pp. 2758–2768, 2006, doi: 10.1016/j.compscitech.2006.03.004.
- [20] G. Souza, “Avaliação de critérios de falhas de compósitos poliméricos reforçados aplicados a vigas sob carregamento de flexão,” 2003.
- [21] R. A. D. da Cunha, J. K. D. Santos, R. C. T. dos S. Felipe, and R. N. B. Felipe, “Comportamento Mecânico Do Compósito Prfv Quando Imerso Em Água Do Mar Por Tempo Prolongado,” *Holos*, vol. 4, p. 78, 2017, doi: 10.15628/holos.2017.5320.
- [22] P. V. Soares, “Análise da durabilidade e degradação de materiais compósitos com base nas curvas S-N,” 2019.
- [23] Z. M. Huang, L. sheng Wang, F. Jiang, and Y. D. Xue, “Detection on matrix induced composite failures,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 205, no. July 2020, p. 108670, 2021, doi: 10.1016/j.compscitech.2021.108670.
- [24] H. Chen, K. Shivakumar, and F. Abali, “A comparison of total fatigue life models for composite laminates,” *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 29, no. 1, pp. 31–39, 2006, doi: 10.1111/j.1460-2695.2006.00958.x.
- [25] E. da Rosa, *Análise de resistência mecânica de peças e componentes estruturais*. 2002.
- [26] A. Muc, M. Barski, M. Chwał, P. Romanowicz, and A. Stawiarski, “Fatigue damage growth monitoring for composite structures with holes,” *Compos. Struct.*, vol. 189, no. January, pp. 117–126, 2018, doi: 10.1016/j.compstruct.2018.01.065.
- [27] M. C. M. Faria, E. C. Botelho, M. O. Cioffi, and M. C. Rezende, “Avaliação da

- resistência à fadiga de compósitos de fibras de vidro/pps.,” no. 4, p. 5, 2007.
- [28] C. Gerendt, A. Dean, T. Mahrholz, N. Englisch, S. Krause, and R. Rolfes, “On the progressive fatigue failure of mechanical composite joints: Numerical simulation and experimental validation,” *Compos. Struct.*, vol. 248, no. March, p. 112488, 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112488.
- [29] A. L. Silva, M. Varanis, A. G. Mereles, C. Oliveira, and J. M. Balthazar, “A study of strain and deformation measurement using the Arduino microcontroller and strain gauges devices,” *Rev. Bras. Ensino Fis.*, vol. 41, no. 3, 2019, doi: 10.1590/1806-9126-RBEF-2018-0206.
- [30] C. Gonçalves, “Efeito de ambientes hostis na resposta à fadiga de laminados vidro/epóxico,” 2019.
- [31] B. Harris, Ed., *Fatigue in Composites: Science and Technology of the Fatigue Response of Fibre-Reinforced Plastics*. Elsevier, 2003.