



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Estudo do efeito da percentagem de fibra na resistência à fadiga de compósitos de fibra curta carbono / epóxi

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

Assessment of the effect of fiber percentage on fatigue resistance of fiber composites short carbon / epoxy

Autor

Daniel Afonso Lourenço Correia

Orientadores:

José António Martins Ferreira

Carlos Alexandre Bento Capela

Júri

Presidente	Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa Professor Associado c/Agreg. da Universidade de Coimbra
Vogais	Professor Doutor Paulo Nobre Balbis dos Reis Professor Auxiliar da Universidade da Beira Interior
Orientador	Professor Doutor José António Martins Ferreira Professor Catedrático da Universidade de Coimbra

Coimbra, setembro, 2017

Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta teria sido muito mais difícil sem o apoio e colaboração de algumas pessoas a quem gostaria de agradecer.

Tenho a agradecer aos meus orientadores Professor Doutor José António Martins Ferreira e Professor Doutor Carlos Alexandre Bento Capela, pela disponibilidade, pelo empenho e conhecimento transmitido.

Gostaria também de agradecer ao Professor Joel Alexandre da Silva de Jesus, pelo apoio e por toda a dedicação, demonstrada na realização de toda a parte experimental deste trabalho.

Um agradecimento também aos meus pais e à minha namorada, por todo o apoio e motivação incondicionais, assim como pela paciência, não só nesta fase, como também ao longo de todo o meu percurso académico.

Aos meus amigos, um a agradecimento pelos momentos de lazer, descontração, e apoio nos momentos mais difíceis ao longo de todo o percurso académico.

Deixo também o meu reconhecimento a todos os outros, que direta ou indiretamente, contribuíram para este trabalho como professores e funcionários.

A todos vocês, muito obrigado.

Resumo

Este estudo realizado na Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra em colaboração com o Instituto Politécnico de Leiria, tem como objetivo a análise do comportamento à fadiga de materiais compósitos, compostos por uma matriz de resina epóxi reforçado com fibras curtas de carbono (com comprimento típico de 0,5mm).

Este material foi estudado com 5 percentagens volúmicas de fibra; 100% Resina epóxi; 5%, 10%, 15%, 17,5% e 20% de fibra de carbono.

O estudo do comportamento à fadiga foi realizado com base nas curvas de resistência (S-N), a análise da rugosidade superficial, porosidade e densidade dos materiais e parâmetros de dano: perda de rigidez e energia de histerese. Para isto, foram realizadas medições de densidade e de rugosidade superficial de modo a relacionar o comportamento à fadiga com o acabamento superficial e com as porosidades.

Concluiu-se que os materiais testados tinham algumas flutuações de densidade, devido a defeitos internos como porosidades, e que estas flutuações de densidade têm grande influência na resistência à fadiga. Concluiu-se também que o acabamento superficial, para o nível de rugosidades ensaiadas, não tem impacto na resistência à fadiga.

O comportamento à tração altera-se com a adição de fibra ao material usado como matriz, tendo as series de maior percentagem de fibra um comportamento de fratura tipicamente frágil e a resina epóxi, que tem comportamento fratura dúctil. Já o comportamento à fadiga de todas as séries ensaiadas é idêntico tendo as curvas S-N declives idênticos.

Tanto a resistência à fadiga como à tração, tende a aumentar com o volume de fibra, atingindo-se o máximo de eficiência do reforço para a série de 17,5%.

Palavras-chave: Fadiga, Fibras curtas de carbono, Materiais compósitos, Epóxi/fibra de carbono, resina epóxi.

Abstract

This study, carried out at the Faculty of Sciences and Technologies of the University of Coimbra, in collaboration with the Polytechnic Institute of Leiria, has the objective of analyzing the fatigue behavior of composite materials composed of an epoxy resin matrix reinforced with short carbon fibers typical compliance of 0.5mm).

This material was studied with 5 percentages of fiber; 100% Epoxy resin; 5%, 10%, 15%, 17.5 and 20% of carbon fiber.

The study of the fatigue behavior was performed based on the curves of resistance (S-N), analysis of surface roughness, porosity and density of materials and damage parameters: loss of stiffness and hysteresis energy. For this, density and surface roughness measurements were performed to correlate fatigue behavior with surface finish and porosity.

It was concluded that the materials tested had some density fluctuations, due to internal defects as porosities, and that these density fluctuations have profound influence on fatigue strength. It was also concluded that the surface finish, for the level of rugosities tested, has no impact on the fatigue resistance.

The tensile behavior changes with the addition of fiber to the material used as a matrix, with the higher fiber series having a typically brittle fracture behavior and the epoxy resin, which has a ductile fracture behavior. The fatigue behavior of all the series tested is identical, with the slopes S-N slopes identical.

Both the fatigue strength and the tensile strength tend to increase with the fiber volume, reaching the maximum reinforcement efficiency for the 17.5% series.

Keywords Fatigue, Carbon Short Fibers, Composite Materials, Epoxy / Carbon Fiber, Epoxy resin.

Índice

Índice de Figuras	v
Índice de Tabelas	vii
Simbologia e Siglas	viii
Simbologia.....	viii
Siglas	ix
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos.....	2
1.2. Tarefas realizadas	2
1.3. Estrutura da dissertação	2
2. Revisão bibliográfica.....	3
2.1. Materiais compósitos	3
2.2. A fibra de carbono	5
2.3. Resinas termoendurecíveis	6
2.3.1. As Resinas epoxídicas	6
2.4. Os materiais compósitos de fibras curtas (SFRP).....	7
2.5. Comportamento à fadiga.....	8
2.5.1. Fluência cíclica.....	11
2.6. Falha de componentes em com materiais compósitos	12
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	14
3.1. Fabricação dos provetes.....	14
3.2. Ensaio de tração	18
3.3. Ensaio de fadiga	19
3.4. Parâmetros de controlo de qualidade dos provetes.....	20
3.4.1. Ensaio de rugosidade	21
3.4.2. Medidas de densidade.....	22
3.4.3. Análise de dispersão de fibras	23
3.4.4. Parâmetros de controlo de dano	24
4. RESULTADOS	26
4.1. Ensaio de tração	26
4.2. Ensaio de Rugosidade	28
4.3. Medidas de densidade.....	30
4.4. Análise de dispersão da fibra	32
4.5. Ensaio de fadiga	32
5. CONCLUSÃO.....	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Diagrama de calcificações dos materiais compósitos	3
Figura 2.2. (A) Fibras de carbono moídas (B) Fibras curtas de carbono (C) Fibra de carbono continua	4
Figura 2.3: Evolução do dano com diferentes níveis de carga (Avanzini et al. 2011)	10
Figura 2.4: Deslocamento do ciclo de tensão- deformação e acumulação de deformação durante os ensaios de fadiga (Avanzini et al. 2013)	11
Figura 2.5 Evolução da deformação média com o numero de ciclos do ensaio de fadiga (Avanzini et al. 2013)	12
Figura 2.6. Curva de dano acumulado por fadiga (D-N)	13
Figura 3.1. Processo de separação das fibras: a) banho de ultrassons; b) evaporação	15
Figura 3.2. Molde usado para produzir as placas	16
Figura 3.3. Prensa usada para aplicar o esforço de compressão	16
Figura 3.4. A - Placa antes da operação de desbaste / B – Placa depois da operação de desbaste	16
Figura 3.5. Fresa de topo	17
Figura 3.6. Exemplo de uma das tiras cortadas	17
Figura 3.7. Exemplo de um provete	17
Figura 3.8. Fresa de Frontal	17
Figura 3.9. Dimensões dos provetes	18
Figura 3.10. Gabari	18
Figura 3.11. Máquina de tração (Instron Universal Testing machine model 4206)	19
Figura 3.12. Extensómetro (MTS, model 632.12C-20)	19
Figura 3.13. Máquina usada nos ensaios de fadiga	20
Figura 3.14. Rugosímetro Mitutoyo SurfTest- SJ-500/P Series	21
Figura 3.15. Representação gráfica do calculo de Ra	22
Figura 3.16. Representação gráfica do calculo de Rz	22
Figura 3.17. Balança usada para medir as densidades: a) massa seca; b) massa molhada ..	23
Figura 3.18. Microcopio digital 3D	23
Figura 3.19. Exemplo de uma curva de histerese obtida	24

Figura 4.1. Representação gráfica dos melhores valores de tensão de rutura para cada série	26
Figura 4.2. Curvas tensão deformação de cada série de volume de fibra.....	27
Figura 4.3. Representação gráfica do valor médio do modulo elasticidade de cada série ..	28
Figura 4.4. Representação gráfica do valor médio de deformação na rutura de cada série	28
Figura 4.5. Acabamento superficial de cada série	29
Figura 4.6. Representação gráfica dos valores de rugosidade média Ra.....	29
Figura 4.7. Representação gráfica dos valores de Rz	30
Figura 4.8. Densidades dos provetes da série com 5% de volume de fibra.....	30
Figura 4.9. Densidades dos provetes de Resina epóxi.....	31
Figura 4.10. Variação da densidade com o volume de fibra	31
Figura 4.11. imagem microscopia da superfície do provete.....	32
Figura 4.12. Curvas S-N obtidas com os ensaios de fadiga	33
Figura 4.13. Ciclos de histerese do ensaio com $N_R = 2163889$ ciclos $\sigma_{max} = 22,5MPa$ da série 100% resina.....	34
Figura 4.14. Variação do modulo de elasticidade ao longo do e ensaio do ensaio com $N_R = 2163889$ ciclos $\sigma_{max} = 22,5MPa$ da série 100% resina.....	34
Figura 4.15. Variação da energia de histerese ao longo do ensaio com $N_R = 2163889$ ciclos $\sigma_{max} = 22,5MPa$ da série 100% resina	35
Figura 4.16. Imagem microscopia da superfície de rutura	36
Figura 4.17. Ciclos de histerese do ensaio com $N_R = 423344$ ciclos $\sigma_{max} = 50MPa$ da série $V_f = 20\%$	37
Figura 4.18. Perda de rigidez ao longo do ensaio de fadiga ($\sigma_{max}=60 MPa$; $N_R=7343$ ciclos; serie $V_f=20\%$)	38
Figura 4.19 Perda de rigidez ao longo do ensaio de fadiga ($\sigma_{max}=50 MPa$; $N_R= 423344$ ciclos; serie $V_f=20\%$).....	38
Figura 4.20 Variação da energia de histerese ao longo do ensaio com $N_R = 423344$ ciclos $\sigma_{max}=50MPa$ da série com $V_f=20\%$	39
Figura 4.21 Variação do desvio com a densidade ($F_v = 5\%$ e $F_v=17,5\%$)	40
Figura 4.22. Vadição do desvio com a rugosidade R_z ($V_f = 5\%$ e $V_f=17,5\%$)	40
Figura 4.23. Vadição do desvio com a rugosidade R_a ($V_f = 5\%$ e $V_f=17,5\%$)	40

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Comprimento da amostra, l_m , e comprimento da margem, l_r , consoante R_a e R_z	21
Tabela 4.1. Propriedades mecânicas das séries avaliadas	28
Tabela 4.2 Resistência à fadiga para 10^6 ciclos (tensões nominais).....	33

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

- D – Dano provocado por fadiga
- E – Módulo de Elasticidade ou modulo young
- E_0 – Módulo de Elasticidade inicial
- E_d – Módulo de Elasticidade dinâmico
- E_f – Módulo de Elasticidade final (antes da rutura)
- $\Delta\sigma$ – Gama de tensões de fadiga
- σ_R – Tensão de rotura
- σ_{f0} – Tensão de limite de fadiga
- σ_{max} – Tensão máxima de um ciclo de fadiga
- σ_{min} – Tensão mínima de um ciclo de fadiga
- V_f – Volume de fibra
- N – Número de ciclos decorridos
- N_R – Número de ciclos decorridos a quando de rutura
- m_s – massa seca do provete
- m_m – massa do provete emerso em água
- ϵ_m – Deformação média de ciclo de fadiga
- ϵ_{max} – Deformação máxima de um ciclo de fadiga
- ϵ_{min} – Deformação mínima de um ciclo de fadiga
- R_z – Rugosidade máxima
- R_a – Rugosidade média
- ρ_p – Densidade do provete
- ρ_w – Densidade da água

Siglas

SFRC – Short Fiber Reinforcement Composites (Compósitos Reforçados por Fibras Curtas)

SFRP – Short Fiber Reinforcement Polymer (Polímero Reforçados por Fibras Curtas)

SFTCs – Short Fiber Thermoplastic Composites (Compósitos de matriz Termoplástica Reforçados por Fibras Curtas)

PAN – Poliacrilonitrila

PEEK – Poliéter-éter cetona

PTFE – Politetrafluoretileno (*teflon*)

1. INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos foram usados pela primeira vez em 1960 nas pás do rotor de motor de avião. A necessidade de materiais mais leves, para diversas aplicações, levou a um grande desenvolvimento e aplicação, de materiais compósitos. Nos dias que correm, a aplicação industrial de materiais compósitos tem crescido rapidamente, deixando de ser materiais com utilizações específicas, como componentes desportivos de alta performance, indústria aeroespacial e aeronáutica, para serem agora aplicados em aplicações mais vulgares (indústria automóvel, construção civil, entre outros).

Materiais compósitos de matriz polimérica, reforçados com fibras, são o tipo de materiais compósitos com utilização mais corrente, pois são viáveis economicamente, são de fabrico simples e oferecem boas propriedades

Ainda assim, o fabrico de peças por processos mais tradicionais, ou seja, aplicação das fibras camada a camada, é um processo com custos elevados e demoroso. Como tal, a utilização de termo plásticos reforçados com fibras curtas (SFRP) em componentes estruturais tem vindo a crescer, tendo como vantagem a facilidade de processamento e baixo custo associados à manufatura e processamento de termoplásticos.

Por exemplo o caso do compósito em estudo é um material muito versátil, devido tanto ao tipo de processo de fabrico, que permite fabricar componentes com geometrias complexas, como as propriedades mecânicas que oferece.

A utilização de materiais compósitos reforçados com fibras curtas, em componentes estruturais e componentes sujeitos a cargas cíclicas, leva a que a fadiga seja o principal modo de falha destes componentes. Por este motivo, é evidente que um estudo, do comportamento à fadiga destes materiais, é de facto importante, de modo a estimar a vida para um componente, para assim projeta-lo de forma adequada e evitar uma falha catastrófica. Já muitos estudos deste tipo foram realizados, incluindo modelação numérica para o dano provocado por este tipo de solicitação. No entanto, o dano provocado por fadiga num material compósito é um fenómeno bastante complexo, porque o comportamento do

material varia de acordo com inúmeros fatores como: o polímero usado como matriz do compósito, tipo de fibras, comprimento, orientação e percentagem de fibra.

1.1. Objetivos

O objetivo do trabalho aqui exposto é caracterizar e analisar do efeito da percentagem de fibras no comportamento à fadiga de materiais compósitos de fibras curtas de carbono (comprimento típico de 0.5mm) e matriz epóxi. Assim como identificar os mecanismos de dano levam à rutura por fadiga e que tipos de defeitos levam ao decréscimo da resistência à fadiga.

1.2. Tarefas realizadas

Para realizar este estudo foi necessário proceder as algumas tarefas, como:

- Produção do material compósito com as diferentes percentagens de fibra.
- Maquiagem de provetes para usar nos ensaios
- Medição do valor da densidade de cada provete
- Medição da rugosidade superficial de cada provete
- Realizar ensaios de tração e de fadiga
- Por fim tratar e analisar os resultados obtidos

1.3. Estrutura da dissertação

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos, como se descreve a seguir. O segundo capítulo conta com uma revisão bibliográfica, que tem o intuito de enquadrar o trabalho e explicar o que são materiais compósitos reforçados com fibras, mostrar como são usados, os estudos já realizados e que tipo de falhas ocorrem nestes materiais. O terceiro capítulo descreve o procedimento experimental usado para obter os resultados apresentados no capítulo quatro. No quinto e último capítulo apresenta-se a principais conclusões retiradas do trabalho desenvolvido e algumas sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Materiais compósitos

Os materiais compósitos tem uma vasta aplicação na indústria aeroespacial, automóvel e na construção, porque oferecem alta resistência e rigidez específica, que possibilita poupanças de energia, em todas as áreas dos transportes (Mao e Mahadevan 2002; Pathak et al. 2016). São compostos por dois ou mais materiais diferentes, e podem-se encontrar das mais variadas formas e aplicações. Por norma, materiais compósitos, são constituídos por um material a que se designa como matriz, que podem ser materiais poliméricos, cerâmicos ou metálicos, e um outro material de enchimento ou reforço.

Dependendo do tipo de matriz e do tipo de reforço e da sua distribuição pela matriz, os materiais compósitos recebem diferentes classificações como se representa no diagrama acima (Figura 2.1). O compósito em estudo corresponde então, à classificação de compósitos fibrosos de fibras descontínuas com orientação aleatória.



Figura 2.1. Diagrama de classificações dos materiais compósitos

Compósitos fibrosos são todos os compósitos cujo o reforço são fibras. Estas fibras podem ser fibras contínuas ou descontínuas, ou seja, as fibras contínuas são dispostas na matriz de forma organizada e direcional, ao longo do material, (Figura 2.2 [C]) já as fibras descontínuas são fibras curtas ou moídas (dependendo do seu comprimento típico), que normalmente são dispersas de forma aleatória pela matriz, (Figura 2.2 [A e B]).



Figura 2.2. (A) Fibras de carbono moídas (B) Fibras curtas de carbono (C) Fibra de carbono continua

Dependendo do tipo, distribuição e material das fibras bem como do material usado como matriz, obtêm-se diferentes propriedades mecânicas do material compósito.

Em compósitos de fibras contínuas, as fibras são dispostas em camadas (laminados) de forma a ficarem na direção do esforço principal aplicado ao componente (direção preferencial, y), ou seja, são normalmente aplicadas no plano X na direção Y , fazendo com que as propriedades do material sejam fortemente influenciadas pelas fibras nesta direção, deixando a direção segundo Z dependente das propriedades da matriz, o que é uma desvantagem em algumas condições de carregamento, (Borrego et al. 2014). Este é também, um processo de deposição que muitas vezes é manual, pelo que é mais moroso e exige mais mão de obra que os outros métodos de fabrico. Por outro lado, dá origem a componentes com melhores propriedades mecânicas. As fibras têm então um papel importante na resistência do componente, e a matriz polimérica oferece suporte e mantém as fibras na orientação correta (Pathak et al. 2016).

Nos compósitos de fibras descontínuas ou fibras curtas, as fibras são dispostas de forma aleatória, ou seja, sem qualquer tipo de direção preferencial. Podem ser aplicadas de duas formas, projetadas em camadas, sobre o molde e previamente revestido com resina (matriz), ou podem ser diretamente misturadas com a matriz e posteriormente a mistura é injetada ou vazada num molde. Em ambos os casos, são processos de fabrico rápidos e que

usam pouca mão de obra, relativamente aos compósitos laminados. Neste tipo de compósitos as propriedades mecânicas são dominadas pelo volume de fibra usado no compósito (Pathak et al. 2016).

No caso do material em estudo (fibras curtas de carbono/epóxi), as fibras com um comprimento típico de 0,5 mm, estão dispostas de forma aleatória, e são previamente misturadas com a resina epóxi antes da moldação. Este tipo de compósito pode ser usado em elementos estruturais, componentes automóveis e numa grande variedade de indústrias, pois permite produzir componentes com geometria bastante complexa, uma vez que pode ser conformado como qualquer polímero.

2.2. A fibra de carbono

As fibras de carbono como o próprio nome indica são filamentos cuja composição é carbono. Cada fibra de carbono é composta por várias cadeias moleculares de átomos de carbono ligados covalentemente entre si.

Estas fibras podem ser obtidas principalmente a partir de dois polímeros a que se chamam de precursores, e são o poliácridonitrilo (PAN) e o breu.

O precursor mais comum é o PAN que é um termoplástico obtido da polimerização vinílica de acrilonitrila. Para a produção de fibra de carbono o polímero passa por três etapas: estabilização, carbonação, grafitização.

Na primeira etapa (estabilização) as fibras de PAN são esticadas de forma a que as redes fibrilares se alinhem segundo a mesma direção do esforço aplicado, no interior de cada fibra. Depois, e ainda tracionadas, são oxidadas ao ar, a uma temperatura de 200 a 220°C.

Na segunda etapa (carbonação), as fibras são aquecidas até se transformarem em fibras de carbono pois são eliminados o oxigénio, hidrogénio e nitrogénio que compõem a cadeia molecular do precursor (PAN). Este processo é feito em atmosfera inerte a temperaturas entre os 1000 e 1500°C, formando-se no interior de cada fibra, fibrilas com estrutura de grafite, que promovem um aumento da resistência à tração da fibra.

A terceira etapa (grafitização) só é usada no caso de ser necessário aumentar o módulo elasticidade das fibras, tendo em conta a perda de resistência à tração no processo.

Este processo é realizado a temperaturas acima dos 1800°C e tem como objetivo melhorar a orientação preferencial das cristalites de grafite.

Esta fibra tem valores de resistência a tração muito elevados, entre 2,34 e 3,17 GPa, modulo elasticidade entre 193 e 413GPa, e ainda densidades bastante baixas com valores entre 1,7 e 2,1 g/cm³. Oferecem também baixo coeficiente de dilatação térmica, boa resistência a altas temperaturas, mas tem como desvantagens a baixa resistência ao impacto, pouca deformação antes da rutura, fratura frágil e baixa resistência à compressão.

2.3. Resinas termoendurecíveis

A resina epóxi usada na matriz do material compósito em estudo é um termoendurecível.

Os polímeros termoendurecíveis tem uma estrutura molecular reticulada em que as ligações primárias são covalentes. Este tipo de polímero pode formar ligações (cura) por aquecimento ou por reação química a temperatura ambiente (Smith 1998).

Devido às ligações covalentes este tipo de polímeros não pode ser refundido, ou seja, apesar de as peças fabricadas com este tipo de polímeros possam ser amaciadas, depois de curadas não é possível voltar ao estado de fluido. Este facto impossibilita a reciclagem de peças e desperdícios e dificulta a produção de peças por injeção, porque depois de injetado o polímero teria de ficar o tempo necessário à cura, dentro do molde, não se podendo assim abrir o molde de forma expedita como é feito para um termoplástico, pelo que a forma mais convencional de processar este tipo de polímeros é a moldação por compressão (Smith 1998).

Os termoendurecíveis têm como vantagens as seguintes características:

- Boa estabilidade térmica;
- Elevada rigidez;
- Boa estabilidade dimensional;
- Resistência à fluência;
- Resistência à deformação.

2.3.1. As Resinas epoxídicas

As resinas epóxi são, como já referido, um polímero termoendurecível. As resinas epóxi, não formam produtos de reação aquando da sua cura, ou seja, não se formam

“desperdícios”, pelo que se obtém, com estas resinas uma boa estabilidade dimensional da peça fabricada. Outro ponto importante que torna estas resinas eficazes como matriz de um material compósito, é a sua capacidade de adesão a outros materiais, ou seja, tem boa capacidade para aderir às fibras de reforço usadas no material compósito.

Para além disto, antes da cura estas resinas estão no estado líquido, com baixa viscosidade, o que permite uma boa molhagem das superfícies e impregnação da resina nas fibras, o que contribui para a boa adesão da resina às fibras de reforço e baixa porosidade. A baixa viscosidade da resina antes de curada facilita também o vazamento ou a moldação na forma final da peça pretendida.

Depois do processo de cura as resinas epóxi oferecem um valor do módulo de elasticidade alto, boa estabilidade com a temperatura e boa resistência química (Jin et al. 2011). Por outro lado, têm comportamento de fratura frágil e pouca resistência à propagação de fendas (Levita et al. 1991).

As resinas epóxi são muito usadas como revestimentos de proteção como pinturas automóveis, isolamentos de fios, componentes eletrónicos, colas, entre outros, devido à sua resistência mecânica, química e dielétrica. Outra utilização deste tipo de resinas, é no fabrico de laminados e outros tipos de compósitos, como matriz reforçada por fibras de elevado módulo de elasticidade como fibras de vidro e de carbono (Smith 1998), como no caso em estudo.

2.4. Os materiais compósitos de fibras curtas (SFRP)

Polímeros reforçados com fibras curtas (SFRP) são materiais compósitos com algumas vantagens, relativamente aos compósitos reforçados com fibras contínuas, vantagens como propriedades mecânicas quase isotrópicas e como já referido, baixo custo de produção, devido ao processamento mais simples. Por outro lado, oferecem também baixo peso, mas resistência inferior aos compósitos reforçados com fibras contínuas. Por este motivo são usados em estruturas com carregamentos moderados (Yue e Hu 2000; Kuriger et al. 2002).

Para além disto, têm ainda a vantagem de poder ser moldados em geometrias mais complexas que compósitos de fibras contínuas, visto ser possível fabricar componentes por injeção plástica ou moldação (Mortazavian e Fatemi 2015b; Fu e Lauke 1998). No caso particular da resina epóxi, visto ser um termoendurecível, ao contrário de um termoplástico,

não é viável a produção de componentes por injeção plástica, porque os termoendurecíveis tem um tempo de cura relativamente longo, que impede a abertura do molde de injeção de forma expedita.

Resultados de testes já realizados provam que a adição de fibras de reforço (mesmo que em pequena quantidade) à resina epóxi, melhora significativamente as propriedades mecânicas deste polímero,(Matei et al. 2016).

2.5. Comportamento à fadiga

Os ensaios de são realizados para que se possa caraterizar o comportamento de um material sujeito a carregamentos abaixo da sua tensão de rutura, de forma cíclica. Estes ensaios, tem como objetivo obter curvas tensão - número ciclos até à fratura (curvas S-N).

A resistência de um material à fadiga está dependente de entre outros fatores, do acabamento superficial e defeitos internos e superficiais.

A análise da fadiga em materiais compósitos é normalmente bastante complexa, pois os constituintes do material, tem propriedades bastante diferentes. Ou seja, o comportamento de um constituinte do material pode ser influenciado pela presença de um outro e existem também problemas nas zonas da interface entre a matriz e as fibras (Mao e Mahadevan 2002).

Existem já bastantes estudos do comportamento à fadiga de compósitos laminados, mas em compósitos de fibras curtas misturados de forma aleatória na resina como do caso em estudo, existem relativamente poucos, em especial sobre o caso particular de compósitos de fibras muito curtas, com comprimento típico de 0,5 mm.

Os ensaios de fadiga podem ser realizados de diversas formas, podendo-se variar a carga aplicada, o tipo de ciclo ($R=0$; 1 ou -1) e a frequência do ciclo, para que os resultados e os mecanismos de dano resultantes sejam também diferentes.

Existem correlações paras as curvas S-N, tanto lineares como não lineares. Uma correlação linear, entre a tensão máxima S e o logaritmo do número de ciclos de rutura N_R , bastante usada é:

$$S = m \log N_R + b$$

Em que m e b são parâmetros relativos a propriedades do material.

Avanzini et al. (2011) realizou ensaios em provetes com a forma tradicional (osso de cão) em PEEK reforçado com fibras curtas de carbono, grafite e PTFE (10% fração de peso) os quais foram produzidos por extrusão. A análise com microscópio ótico, revelou uma distribuição das fibras na matriz quase aleatória, ou seja, não se identifica uma distribuição em camadas ou uma direção preferencial da orientação das fibras. Este resultado depende muito da forma como são produzidas as placas usadas para fabricar os provetes, o exemplo particular deste compósito (PEEK/fibras curtas de carbono) quando injetado ou produzido por moldação, apresentam uma camada exterior com direção preferencial das fibras, cuja espessura dessa mesma camada depende da velocidade de injeção da viscosidade da matriz e da temperatura (Avanzini et al. 2013). Ou seja, componentes industriais produzidos com estes materiais, mas obtidos em condições diferentes, podem ter, comportamento, propriedades e microestrutura diferentes.

Os compósitos de matriz termoplástica reforçados com fibras curtas (SFTCs), tem temperaturas de fusão relativamente baixas e algumas propriedades dependentes do tempo. Como tal a frequência de carregamento aplicada no ensaio, tem influência no comportamento à fadiga destes materiais, (Mortazavian e Fatemi 2017; Kawai et al. 2017).

Avanzini et al. (2011) realizou testes de fadiga uniaxial com ciclo pulsante ($R=0$) com controlo de carga com uma frequência de 10Hz. Esta frequência permite ter um teste com uma duração razoável sem que a temperatura do provete aumente devido ao efeito de histerese.

O aumento da temperatura do provete influencia significativamente as propriedades mecânicas do material, mas com base nos resultados obtidos nos ensaios realizados por Avanzini et al. (2011), a alteração das propriedades mecânicas devido ao aumento da temperatura pode ser desprezado, uma vez que termoplástico usado (PEEK) é da família de polímeros com resistência a alta temperatura e por isso o ligeiro aumento de temperatura durante os ensaios é insignificante.

No caso dos termoendurecíveis, como a resina epóxi, o efeito da temperatura é muito mais reduzido que no caso dos termoplásticos, porque são mais estáveis a temperaturas elevadas, como tal a temperatura também não será um problema neste estudo.

Para quantificar o dano provocado por fadiga, foi usado o módulo de Young ou a redução do mesmo, durante os ensaios de fadiga (Avanzini et al. 2011; Avanzini et al. 2013).

A forma das curvas de dano (D-N), representadas na Figura 2.3, varia com a carga aplicada, analisando estas diferenças sugerem que existam diferentes tipos de dano, dependendo da carga aplicada (Mortazavian e Fatemi 2015a; Mao e Mahadevan 2002).

Também é expectável que no caso do material em estudo ocorram diferentes tipos de dano dependendo da tensão aplicada.

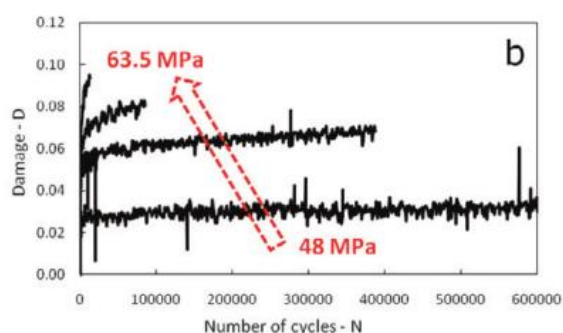


Figura 2.3: Evolução do dano com diferentes níveis de carga (Avanzini et al. 2011)

Em alguns termoplásticos reforçados com fibras curtas (SFTCs) o dano por fadiga evolui em diferentes estágios, inicialmente ocorre micro-fissuração e micro espaços vazios na matriz, coalescência e propagação de defeitos e por fim propagação de fissuras e fratura de fibras. Estes fenómenos podem ocorrer em simultâneo e / ou por vezes com predominância de um tipo, dependendo do material e das condições do ensaio (Avanzini et al. 2013).

Para além das curvas S-N usadas para caracterizar o comportamento dos materiais à fadiga, podem também ser usadas curvas D-N (dano/numero de ciclos) aplicando modelos para quantificar o dano como apresentado por Mao e Mahadevan (2002) o dano por fadiga pode ser quantificado com:

$$D = 1 - \frac{E}{E_0} \quad (2.1)$$

Em que D é a o dano acumulado por fadiga, E_0 é o módulo Young inicial do material e E o módulo de Young do material com dano. Este modelo foi também usado por Avanzini et al. (2013). Mas desta forma o dano nunca é 0, porque o módulo de Young mesmo

antes da rotura não é 0, equação (2.1). De modo a que o dano acumulado varie de 0 a 1, usa-se o modelo de dano seguinte:

$$D = \frac{E_0 - E}{E_0 - E_f} \quad (2.2)$$

Em que E_f é o módulo Young do material antes da rutura.

2.5.1. Fluência cíclica

A fluência cíclica ou *Cyclic creep*, ocorre devido a acumulação de deformação devido ao dano provocado com cada ciclo do ensaio de fadiga. Este aumento progressivo da deformação está representado qualitativamente na Figura 2.4.

Os materiais termoplásticos SFR sofrem também fluência cíclica (Avanzini et al. 2013) ou seja, durante carregamentos cíclicos observa-se um amaciamento, ou decréscimo do valor do módulo de elasticidade, isto deve-se tipicamente à iniciação e crescimento de fissuras na matriz, e nas interfaces matriz-fibra, (Mortazavian e Fatemi 2017).

Para monitorar este fenómeno, nos ensaios realizados por Avanzini (2013) foi registado continuamente valor máximo e mínimo da deformação a cada ciclo, calculando a média obteve-se a deformação média de cada ciclo ϵ_m . Colocando a deformação em função do número de ciclos N obtém-se as curvas da Figura 2.5.

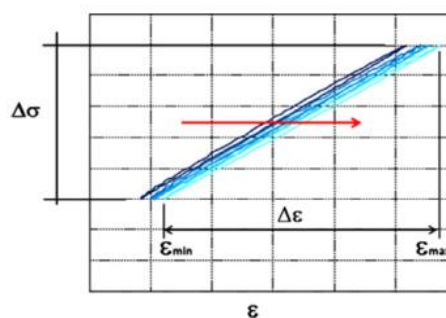


Figura 2.4: Deslocamento do ciclo de tensão- deformação e acumulação de deformação durante os ensaios de fadiga (Avanzini et al. 2013)

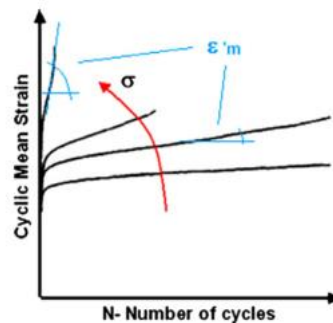


Figura 2.5 Evolução da deformação média com o numero de ciclos do ensaio de fadiga (Avanzini et al. 2013)

2.6. Falha de componentes em materiais compósitos

A falha de componentes em materiais compósitos pode ocorrer, como em qualquer outro material, por excesso de carga, fadiga e fluência. O comportamento dos materiais compósitos em situações de cargas cíclicas é, no entanto, diferente de, por exemplo, um material metálico. O dano provocado por carregamentos cíclicos, em componentes fabricados em materiais compósitos, vai-se acumulando com cada ciclo, levando à fratura ou perda da funcionalidade do componente. Ao contrário dos materiais homogêneos, como metais, em que o dano ocorre inicialmente de forma mais lenta, evoluindo para uma só fissura que se propaga na direção perpendicular à direção de aplicação da carga, nos materiais compósitos reforçados com fibras curtas (SFRC) a fratura é caracterizada por vários modos de falha, tais como; fissuração, perda de coesão entre a fibra e a matriz (ou seja a matriz separa-se das fibras), fratura das fibras, aparecimento de espaços vazios e fratura multidirecional. Estes modos de falha ocorrem de forma gradual com a vida do componente, e afetam de maneiras diferentes a resistência do material, de maneira que a curva D-N não é linear como é apresentada na Figura 2.6 por Mao e Mahadevan (2002)

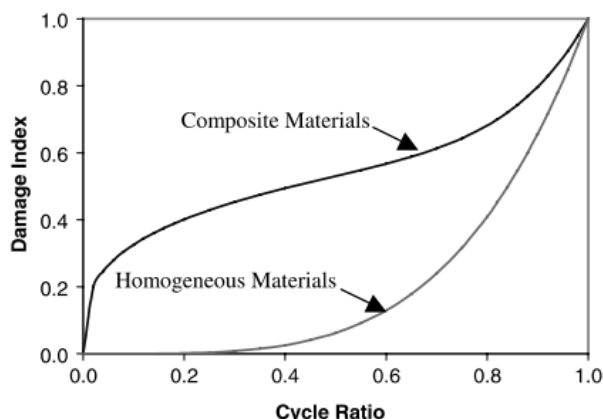


Figura 2.6. Curva de dano acumulado por fadiga (D-N)

A iniciação de fissuras e o crescimento das mesmas em SFRC, é bastante complexo. As fissuras iniciam-se em locais e direções diferentes de forma um pouco aleatória. Por exemplo podem iniciar-se fissuras na matriz na direção perpendicular à direção da carga aplicada, mas também podem iniciar-se na direção das fibras devido ao descolamento da matriz.

Para caracterizar a vida à fadiga de materiais compósitos, pode usar-se o conceito de acumulação de dano, contudo não é possível medir diretamente o dano por fadiga. Para isso usa-se o módulo de Young do material, que se deteriora com o aumento do dano provocado por fadiga, (Mao e Mahadevan, 2002).

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Como já referido anteriormente, o objetivo do estudo realizado nesta dissertação é caracterizar o comportamento à fadiga de materiais compósitos compostos por fibras curtas de carbono em matriz epóxi.

Para realizar este estudo foram realizados ensaios destrutivos em provetes com diferentes percentagens de fibra. Inicialmente, foram realizados ensaios de tração para determinar o nível de tensão de ciclo nos ensaios de fadiga e também para avaliar o comportamento estático deste compósito. Depois realizaram então os ensaios de fadiga.

3.1. Fabricação dos provetes

Para produzir dos os provetes começou-se por fabricar placas do material composto por e fibras curtas de carbono (comprimento típico de 0,5 mm) e resina epóxi com as seguintes percentagens de fibra:

- Volume de fibra = 10% e fração mássica 18%
- Volume de fibra = 15% e fração mássica 27%
- Volume de fibra = 17,5% e fração mássica 31,5%
- Volume de fibra = 20% e fração mássica 36%
- 100% resina epóxi

A resina epóxi usada foi a Biresin®CR83, combinada com o endurecedor CH183-2, fornecidos pela Sika (Stuttgart, Alemanha). A mistura da resina com o catalisador foi realizada com a relação recomendada pelo produtor de 10:3 em massa. Esta mistura apresenta baixa viscosidade (<10mPa.s) o que facilita o processo de fabrico do material compósito.

As fibras de carbono com comprimento típico de 0,5 mm foram fornecidas pela Sigrafil, SGL group, Alemanha.

As placas de material compósito, foram produzidas, com 150 mm de comprimento, 100 mm de largura e uma espessura que varia entre 5 e 7 mm. Esta variação de espessura e defeitos superficiais, como porosidades, devem-se a algumas dificuldades no processo de produção.

O processo de produção das placas por moldação por compressão inclui as seguintes etapas:

- Primeiro foi realizado um processo de separação das fibras, de modo a obter boa dispersão das mesmas, pela matriz. Neste processo foi adicionado 150 ml do solvente diclorometano a 1 grama de fibra de carbono num balão de Erlenmeyer (Figura 3.1 a)). Esta mistura é agitada mecanicamente durante 5 minutos, depois fica em repouso 1 minuto. Feito isto, a mistura segue para um banho de ultrassons pelo período de 7 minutos com o intuito de aumentar a dispersão das fibras. A mistura é então filtrada e colocada num processo de evaporação à temperatura ambiente durante cerca de 40 horas (Figura 3.1 b)).

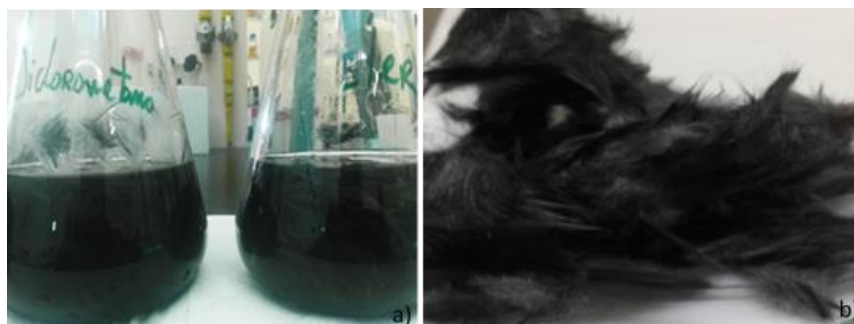


Figura 3.1. Processo de separação das fibras: a) banho de ultrassons; b) evaporação

- Na segunda etapa, a resina epóxi é preparada e misturada com as diferentes percentagens mássicas de fibra, para depois ser colocada a vácuo durante 10 minutos, de modo a retirar as bolhas de ar introduzidas durante a preparação.

- Na terceira etapa, a mistura de fibras com resina é colocada na cavidade do molde representado na Figura 3.2. O molde é então fechado e sujeito a um esforço de compressão, aplicado por uma prensa, (Figura 3.3) de 1500 kg, que corresponde a uma pressão de aproximadamente 45 bar, durante 24h (tempo de cura). Depois da cura estar concluída a placa é então retirada do molde.

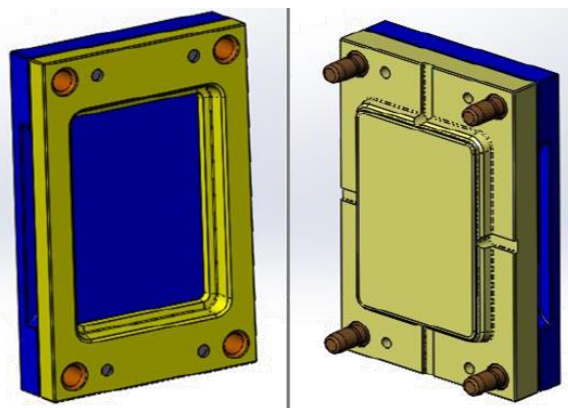


Figura 3.2. Molde usado para produzir as placas



Figura 3.3. Prensa usada para aplicar o esforço de compressão

Todo este processo de fabrico das placas foi realizado no IPL (Instituto Politécnico de Leiria). Posteriormente as placas foram maquinadas, de modo a obter os provetes, no departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

O processo de maquinagem foi realizado em três etapas. A primeira etapa consiste num desbaste das faces de cada placa de modo a remover as imperfeições superficiais e reduzir a espessura para 3 mm para que as placas fiquem todas com a mesma espessura (Figura 3.4)

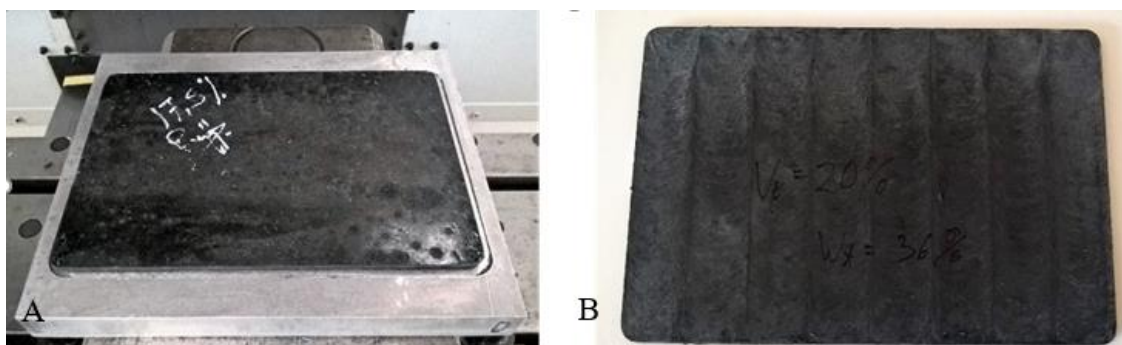


Figura 3.4. A - Placa antes da operação de desbaste / B – Placa depois da operação de desbaste

Este desbaste foi realizado em CNC com a fresa de topo R390-020A20-11M da Sandvik (Figura 3.5) que é uma fresa frontal cilíndrica, com três arestas de corte aço de alto teor de carbono revestido a PVD AlTiCrN. Os parâmetros de maquiagem usados para o desbaste foram, velocidade de avanço de 150 mm/min e a rotação da fresa de 1500 rpm.



Figura 3.5. Fresa de topo

A segunda etapa do processo foi fatiar cada placa em tiras de 14 mm de largura, resultando assim de cada placa, 9 tiras (Figura 3.6). Para este processo de corte foi usada uma serra de fita.

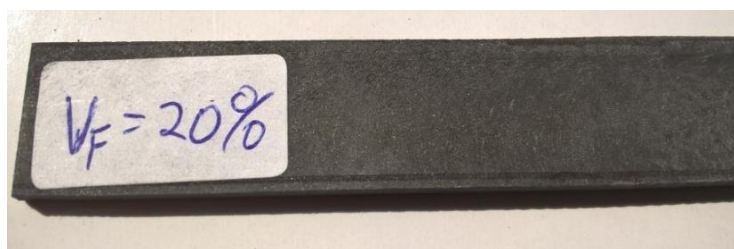


Figura 3.6. Exemplo de uma das tiras cortadas

A terceira e última etapa do processo é a maquiagem do “osso de cão”, de modo a dar a forma convencional de um provete (Figura 3.7) às tiras anteriormente cortadas. Esta fase foi também realizada em CNC usando uma fresa frontal Izar 4600 20 mm-END MILL HSSE8% DIN844N NZ (Figura 3.8) com os seguintes parâmetros de corte: velocidade de avanço de 50 mm/min e a rotação da fresa de 1500 rpm.

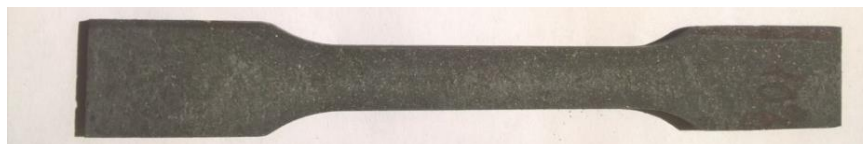


Figura 3.7. Exemplo de um provete



Figura 3.8. Fresa de Frontal

Os provetes foram maquinados com a geometria e dimensões representadas na Figura 3.9.

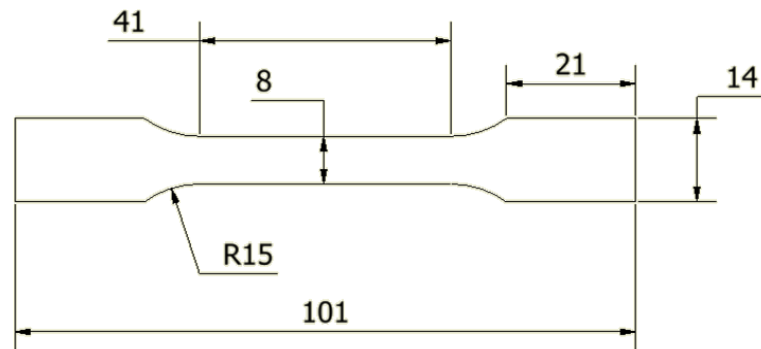


Figura 3.9. Dimensões dos provetes

Para esta fase do processo de maquiagem, as tiras cortadas anteriormente foram fixas num gabari, três a três como se pode observar na Figura 3.10. É então maquinado um dos lados dos provetes, que depois são virados e colocados na face oposta para maquinar o outro lado.



Figura 3.10. Gabari

3.2. Ensaio de tração

Para estes ensaios foi usada a máquina de tração eletromecânica, Instron Universal Testing machine (Instron, High Wycombe, UK), model 4206 (Figura 3.11), com uma velocidade de extensão de 1mm/min. Inicialmente foram testados até à rutura, 3 provetes de cada uma das 5 séries (percentagem de fibra), mas como os resultados para algumas séries não eram consistentes, foram repetidos mais ensaios. Os ensaios de tração foram sempre realizados à temperatura ambiente, aproximadamente 25°C. Nestes ensaios, o

deslocamento foi medido com um extensómetro com curso de 50 mm (MTS, model 632.12C-20) (Figura 3.12).

Com estes ensaios obtiveram-se as curvas de tensão/deformação para cada série de percentagem de fibra. Estas curvas permitiram então obter o valor da tensão de rutura, bem como o módulo de elasticidade e a deformação na rutura.

O módulo de elasticidade foi obtido através do declive da parte reta da curva, tensão/deformação correspondente à deformação elástica. A tensão de rutura e a deformação na rutura obtém-se por leitura direta dos resultados obtidos nos ensaios.



Figura 3.11. Máquina de tração (Instron Universal Testing machine model 4206)



Figura 3.12. Extensómetro (MTS, model 632.12C-20)

3.3. Ensaios de fadiga

Os ensaios de fadiga foram realizados com a máquina electro mecânica da Instron modelo ElectroPuls™ E10000 All-Electric Dynamic Test Instrument (Figura 3.13). Foram feitos ensaios com ciclo de carga pulsante, (R =carga mínima/carga máxima = 0) onda

sinusoidal, com frequência de 15Hz. A carga máxima aplicada é calculada multiplicando tensão máxima (σ_{max}) pela área de secção do corpo de prova de cada provete.



Figura 3.13. Máquina usada nos ensaios de fadiga

Para cada serie de volume de fibra foram testados entre 10 a 15 provetes, inicialmente impondo uma tenção máxima (σ_{max}) a baixo da tensão de rotura (σ_R).

Posteriormente as cargas aplicadas são arbitradas com base no número de ciclos ao qual ocorreu a falha no ensaio anterior.

3.4. Parâmetros de controlo de qualidade dos provetes

Para controlar a qualidade dos provetes foram realizados ensaios de rugosidade e medições das densidades de cada um dos provetes. Posteriormente estes resultados serão compilados graficamente. Para isso foi calculado o desvio, entre a vida estimada em fadiga

para cada série e o resultado de cada ensaio de fadiga. Este desvio foi então contraposto graficamente com os resultados das medidas de rugosidade e de densidade.

3.4.1. Ensaios de rugosidade

Embora os parâmetros de maquinagem usados, tenham sido os mesmos para todas as series de percentagens de fibra, é visível mesmo a olho nu, diferenças de acabamento superficial. Ou seja, os provetes com maior volume de fibra tendem a ficar com melhor acabamento superficial que os outros, de menor volume de fibra.

Os ensaios de rugosidade foram realizados usando um rugosímetro, modelo *Mitutoyo Surftest- SJ-500/P Series* (Figura 3.14) de acordo com a norma DIN EN ISO 4288 standard.

Foram então realizadas três medições em cada provete, e guardado o valor da rugosidade máxima, R_z , da rugosidade média R_a , bem como o perfil de rugosidade. Estas medições foram realizadas com uma velocidade de avanço da ponta do rugosímetro de 5 mm/s, com um comprimento de amostra, l_m de 12,5 mm, com de margem l_r de 2,5 mm para cada lado, como é aconselhado pela a norma NBR ISO 4287/2002 para R_z compreendidos entre 10 μm e 50 μm , (tabela 3.1.).



Figura 3.14. Rugosímetro Mitutoyo Surftest- SJ-500/P Series

Tabela 3.1. Comprimento da amostra, l_m , e comprimento da margem, l_r , consoante R_a e R_z

Rugosidade média R_a [μm]	Rugosidade de pico R_z [μm]	l_r [mm]	l_m [mm]
Até 0,1	Até 0,5	0,25	1,25
De 0,1 até 2,0	De 0,5 até 10,0	0,8	4,0
De 2,0 até 10,0	De 10,0 até 50,0	2,5	12,5
Acima de 10,0	Acima de 50,0	8,0	40,0

O valor de R_a representa a média dos valores segundo z em relação à linha média do perfil de rugosidade, como se representa em (Figura 3.15). R_z corresponde ao valor médio das distâncias segundo z entre o pico mais alto e o vale mais profundo para cada intervalo de comprimento l_r , como se mostra na Figura 3.16. Os valores de R_a e R_z são dados pelas equações (3.1) e (3.2) respetivamente.

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |Z(x)| dx \quad (3.1)$$

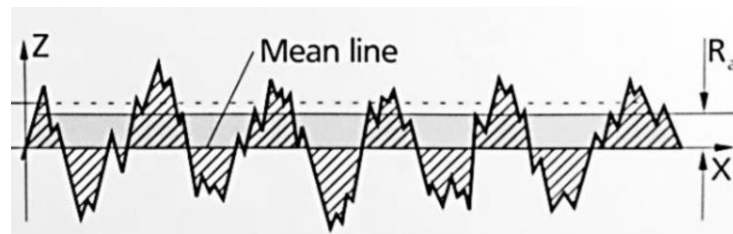


Figura 3.15. Representação gráfica do cálculo de R_a

$$R_z = \frac{1}{n} (R_{z1} + R_{z2} + \dots + R_{zn}) \quad (3.2)$$

$$n = \frac{l_m}{l_r} \quad (3.3)$$

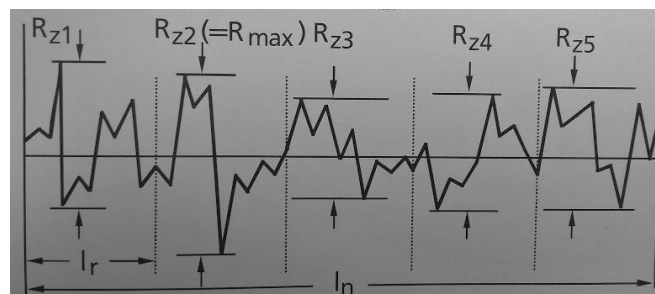


Figura 3.16. Representação gráfica do cálculo de R_z

3.4.2. Medidas de densidade

Uma vez que em algumas séries os resultados dos ensaios de tração não eram consistentes, ou seja, os valores da tenção de rutura para cada série de percentagem de fibra eram muito dispersos, fizeram-se medições da densidade de cada provete. Esta medição tem como objetivo aferir a existência, ou não, de porosidades no material do provete, comparando densidades dentro da mesma série.

A mensuração da densidade de cada provete foi realizada usando a balança, modelo AND GH-202 (Figura 3.17).

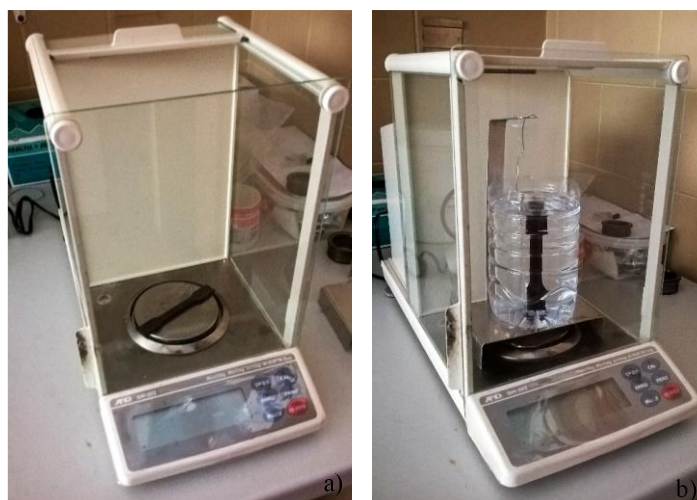


Figura 3.17. Balança usada para medir as densidades: a) massa seca; b) massa molhada

Primeiramente foi medida a massa de cada provete conforme a Figura 3.17 a) (massa seca), de seguida é medido a massa do provete emerso em água destilada, (massa molhada) Figura 3.17 b). A temperatura da água, foi medida usando um termopar de modo a conferir a sua densidade. Depois das medições das massas seca e molhada de cada provete, a sua densidade foi calculada com base no princípio Arquimedes usando a seguinte expressão:

$$\rho_p = \left[\frac{m_s}{(m_s - m_m)} \right] \times \rho_w \quad (3.4)$$

Em que ρ_p corresponde ao valor da densidade do provete, m_s e m_m são respetivamente a massa seca e a massa molhada do provete, ρ_w corresponde á densidade da água à temperatura do ensaio.

3.4.3. Análise de dispersão de fibras

A análise da dispersão das fibras pela matriz foi realizada recorrendo ao microscópio digital 3D modelo Hirox RH-2000, Figura 3.18.

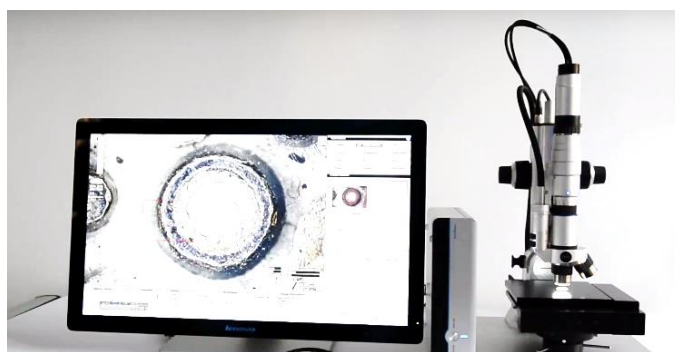


Figura 3.18. Microscópio digital 3D

3.4.4. Parâmetros de controlo de dano

Para avaliar o dano ao longo do ensaio, foram registados os valores da tensão e da deformação para alguns ciclos completos de tensão-deformação, de modo a traçar curvas de histerese, avaliar a energia despendida por histerese e avaliar a perda de rigidez, ou seja, decréscimo do valor do módulo de elasticidade ao longo do ensaio. Este registo foi feito para alguns ciclos pré-definidos.

A energia de histerese foi avaliada com base na área dentro de uma curva de histerese (área a laranja na Figura 3.19).

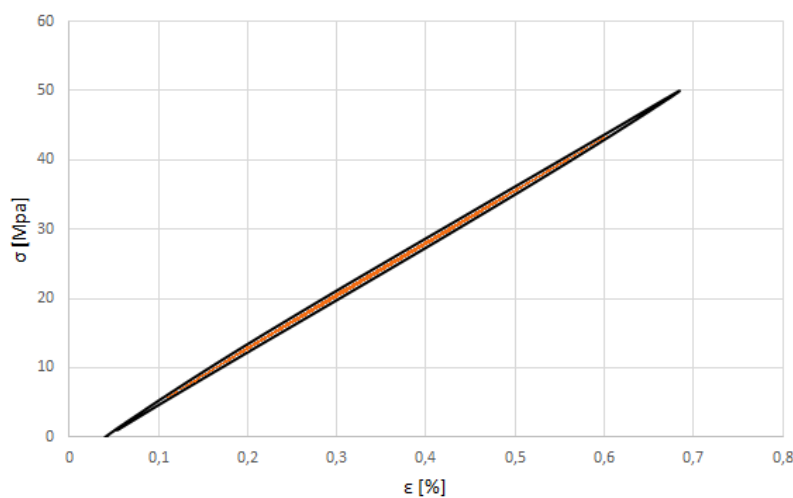


Figura 3.19. Exemplo de uma curva de histerese obtida

Esta área é calculada pelo seguinte método:

- Primeiramente foi ajustada uma curva polinomial ao conjunto de pontos de na parte superior da curva de histerese, e uma outra curva polinomial ao conjunto de pontos na parte inferior da curva. Estas curvas foram ajustadas com uma correlação de $R = 1$;
- De seguida foi calculado de forma analítica o integral, do valor de deformação mínimo ao máximo, das equações das curvas anteriormente ajustadas;
- Feito isto, o valor da área de dentro da curva de histerese, é dado pela diferença entre o valor dos integrais calculados para as curvas ajustadas.

Para avaliar a perda de rigidez, o módulo de elasticidade dinâmico foi calculado pelo declive da reta que une os pontos máximo e mínimo da curva de histerese. É então calculado usando a expressão (3.5)

$$E_d = \left(\frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{\epsilon_{max} - \epsilon_{min}} \right) / 10^3 \quad (3.5)$$

Em que E_d vem em GPa, σ_{max} e σ_{min} são respetivamente a tensão máxima e mínima em MPa do ciclo de fadiga para o qual foi guardado a curva de histerese, ε_{max} e ε_{min} são a deformação máxima e mínima e percentagem, que ocorreu durante o ciclo.

4. RESULTADOS

Neste capítulo apresenta-se os principais resultados obtidos nos ensaios realizados neste trabalho.

4.1. Ensaios de tração

As series de 5% 10%, 15%, 17,5% e 20% de volume de fibra foram sujeitas a ensaios de tração para avaliar a sua resistência mecânica e alongamento na rotura.

Na Figura 4.1 estão dispostas graficamente, as tensões de rutura resultantes de todos os ensaios de tração realizados. Como já referido, para algumas das séries os resultados são muito pouco consistentes. Por exemplo a serie de $V_f = 10\%$, tem tensões de rutura que variam de 30 MPa a 87MPa. Isto deve-se à existência de porosidades no material e problemas com o processo de fabrico, que se vieram a verificar com as medições de densidade.

Selecionando, dentro de uma dispersão razoável os resultados, obtém-se o gráfico da Figura 4.1, onde se pode observar que existe um aumento do valor da tensão de rutura com o aumento da percentagem de fibra do material.

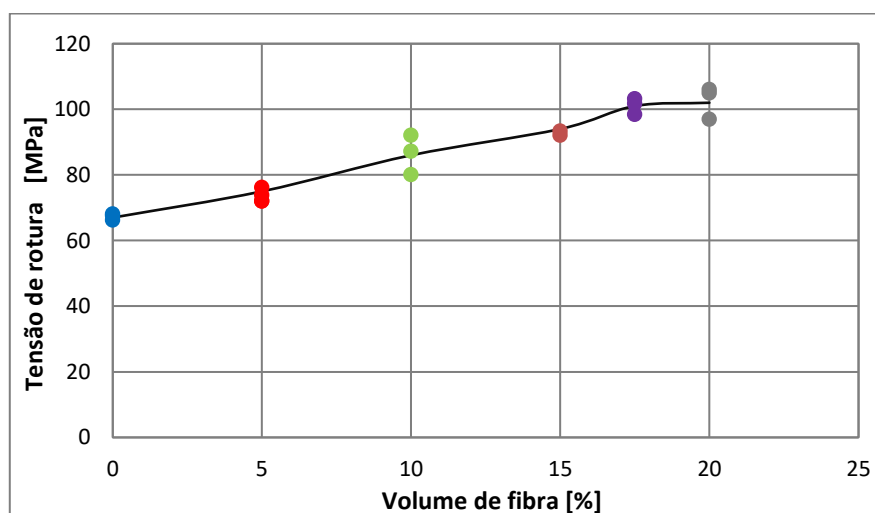


Figura 4.1. Representação gráfica dos melhores valores de tensão de rutura para cada série

As curvas de tensão-deformação obtidas são convencionais, ou seja, a tensão é calculada dividindo o valor da carga pela área da secção do provete.

O comportamento das curvas das várias séries é idêntico, ou seja, estes materiais sofrem muito pouca deformação plástica sendo predominante o regime elástico praticamente até à rutura como se mostra na curva da Figura 4.2.

É possível observar que existe um grande aumento da tensão de rutura com o aumento da percentagem de fibra (Figura 4.1) e uma redução na deformação na rutura (Figura 4.4). Isto é mais evidente nas séries com menor volume de fibra relativamente à série de resina, e torna-se menos evidente entre séries com maior volume de fibra.

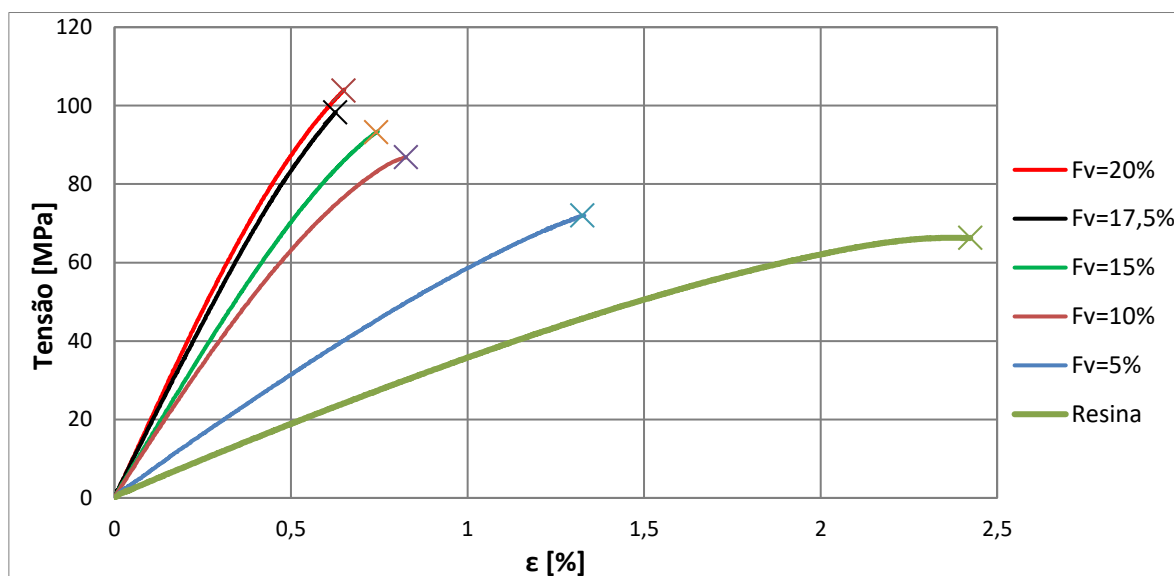


Figura 4.2. Curvas tensão deformação de cada série de volume de fibra

Os valores médios do módulo elasticidade e da deformação na rutura, de cada série de volume de fibra testada, estão compilados de forma gráfica na Figura 4.3 e na Figura 4.4. Desta forma, é mais perceptível o aumento do módulo de elasticidade e a redução da deformação na rotura com o aumento da percentagem de fibra das séries ensaiadas. É de notar também, que o aumento do módulo de elasticidade e a redução da deformação na rutura, tende a estabilizar da série de 17,5% para a série de 20%. Isto é quase não existe melhoria de propriedades mecânicas com o aumento do volume de fibra de 17,5% para 20%, atingindo-se então um máximo de eficiência do reforço com 17,5% de volume de fibra.

O valor médio dos resultados obtidos nos ensaios, da tensão de rutura (σ_R), do módulo de elasticidade (E) e da deformação na rutura (ϵ), pode ser observado na Tabela 4.1.

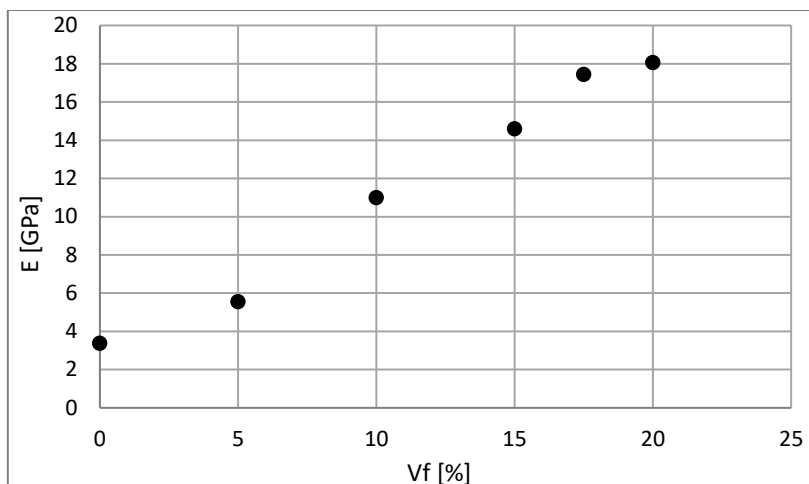


Figura 4.3. Representação gráfica do valor médio do módulo elástico de cada série

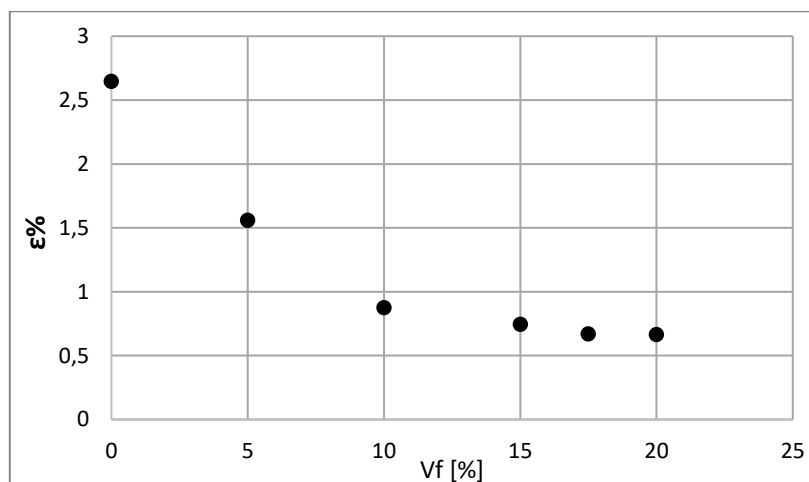


Figura 4.4. Representação gráfica do valor médio de deformação na rutura de cada série

Tabela 4.1. Propriedades mecânicas das séries avaliadas

Vf %	Resina	5%	10%	15%	17,5%	20%
σ_R [Mpa]	65,40	73,57	79,45	92,76	101,19	99,40
E [GPa]	3,383	5,558	11	14,6	17,430	18,062
ε%	2,647	1,561	0,877	0,746	0,672	0,667

4.2. Ensaio de Rugosidade

Apesar dos parâmetros de maquinagem dos provetes serem iguais para as diferentes séries, embora não muito perceptíveis na Figura 4.5, são visíveis diferenças de acabamento superficial.



Figura 4.5. Acabamento superficial de cada série

Comparando a amostra da série de 5% de volume de fibra do lado esquerdo da Figura 4.5 com a amostra da série de 20% do lado direito, é perceptível a diferença de acabamento superficial, sendo que a amostra da série de 20% de volume de fibra apresenta melhor acabamento.

De modo a quantificar esta diferença de acabamento superficial foram realizados ensaios de rugosidade, cujos resultados médios de cada série se apresentam em seguida nos gráficos das Figura 4.6 e Figura 4.7.

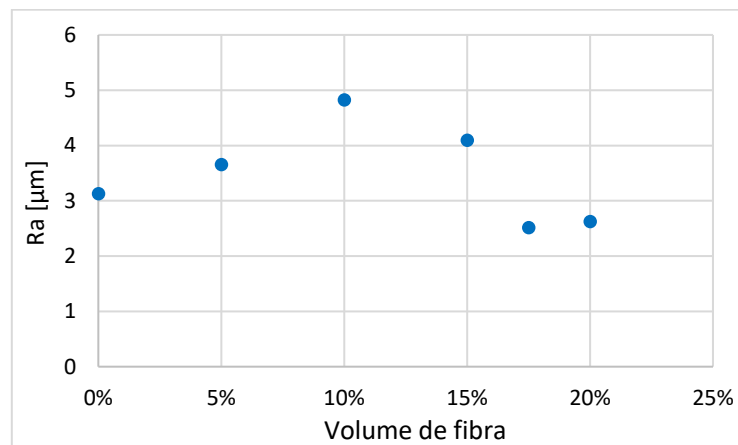


Figura 4.6. Representação gráfica dos valores de rugosidade média Ra

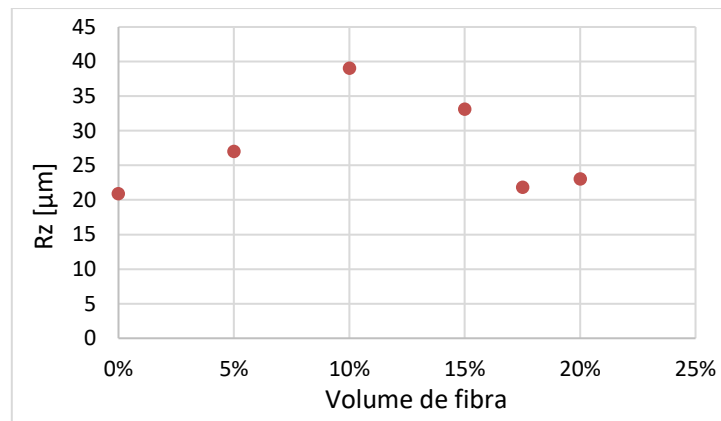


Figura 4.7. Representação gráfica dos valores de Rz

Da Figura 4.6 e da Figura 4.7, observa-se que a série com pior acabamento é a com 10% de volume de fibra e a com melhor acabamento será a série de 17,5% de fibra o que de certo modo confirma as conclusões tiradas visualmente. A série de $V_f = 10\%$ é a que obteve valores de rugosidade mais elevados porque, devido a problemas de fabrico do material desta série, esta apresenta muitas porosidades, que à superfície formam cavidades.

Mais adiante apresenta-se uma análise da combinação destes resultados com os resultados dos ensaios de fadiga.

4.3. Medidas de densidade

Nas medidas de densidade realizadas identificaram-se flutuações de densidade dos provetes da mesma serie de fibra como se mostra, por exemplo para a série de 5% de volume de fibra, na Figura 4.8. Estas flutuações no valor da densidade devem-se essencialmente à presença de porosidades no material.

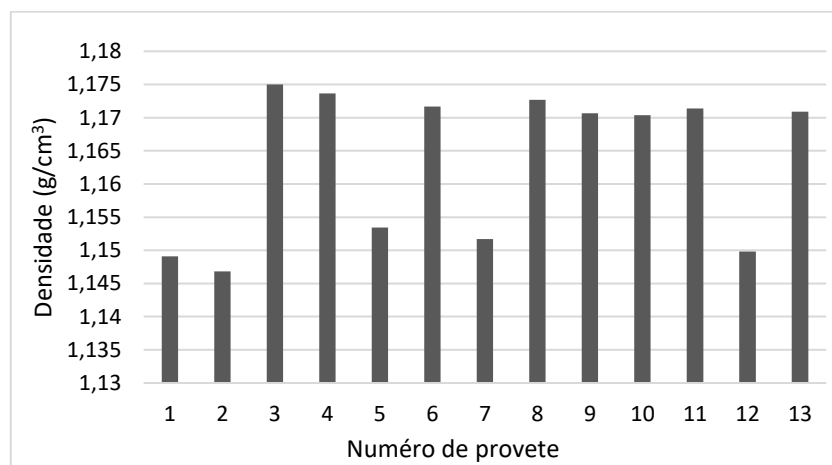


Figura 4.8. Densidades dos provetes da série com 5% de volume de fibra

Também para série de 100% resina epóxi, são evidentes diferenças de densidade entre as duas placas testadas desta série como se pode observar na Figura 4.9, em que os primeiros 6 provetes foram obtidos a partir da primeira placa, e os restantes da segunda placa.

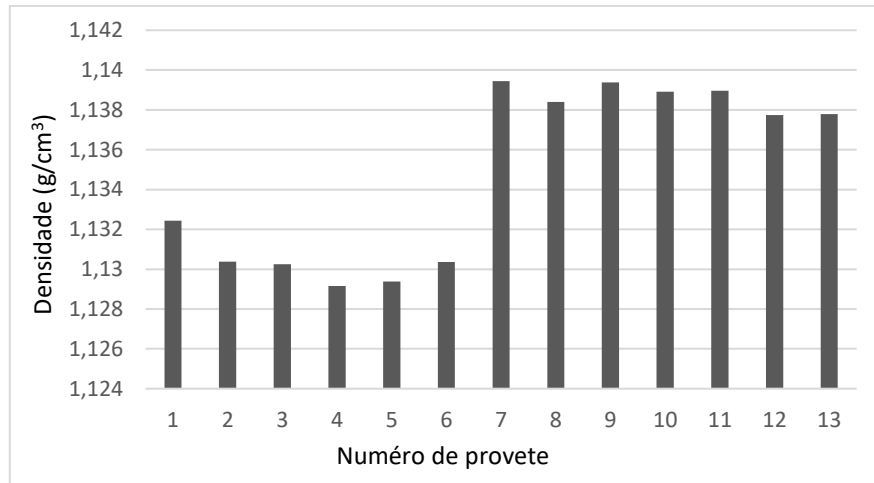


Figura 4.9. Densidades dos provetes de Resina epóxi

Na Figura 4.10 estão expostos os valores médios das medições de densidade feitas a cada série. Como é espectável, observa-se um aumento da densidade com o aumento da percentagem de fibra.

Mais adiante apresenta-se uma análise da combinação destes resultados com os resultados dos ensaios de fadiga.

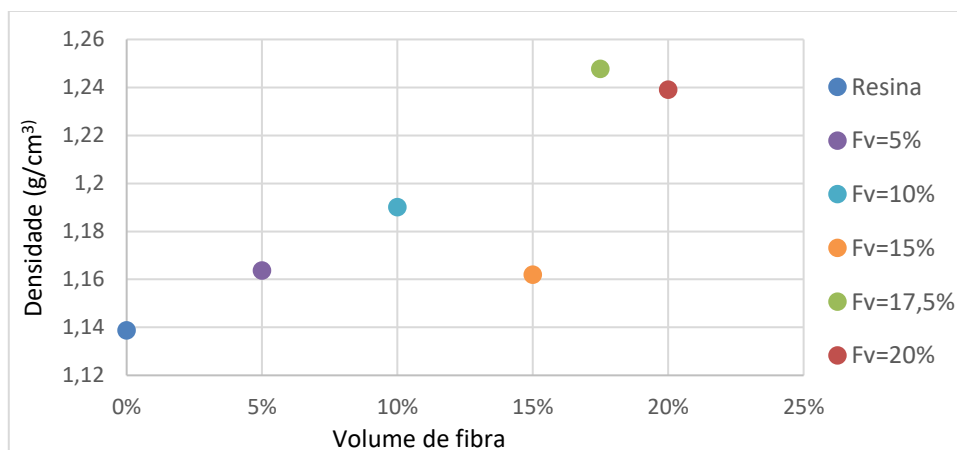


Figura 4.10. Variação da densidade com o volume de fibra

4.4. Análise de dispersão da fibra

A imagem microscópica da Figura 4.11 foi feita na superfície de um provete da série de 17,5% de volume de fibra. Observa-se que a dispersão de fibra é de certa forma aleatória, mas no entanto, existem também espaços vazios ou poros.

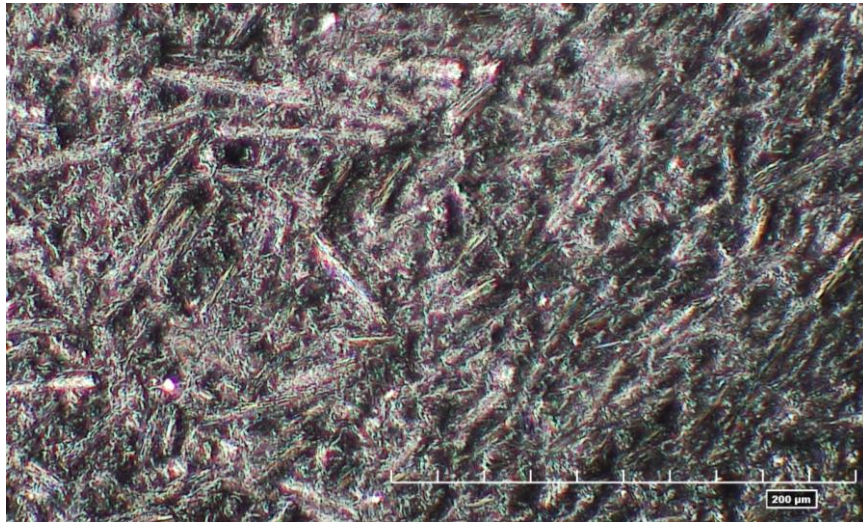


Figura 4.11. imagem microscopia da superfície do provete

4.5. Ensaios de fadiga

Das curvas S-N, (Figura 4.12) obtidas com os ensaios de fadiga realizados a cada uma das séries de fibra pode-se observar que as séries têm comportamento semelhante, ou seja, as curvas têm praticamente o mesmo declive (valor de m na Tabela 4.2) e que existe um aumento da resistência à fadiga com o aumento do volume de fibra do material. Embora, como já anteriormente observado nos ensaios de tração, a série com volume de fibra 17,5%, tenha maior resistência que a série de 20% de volume de fibra. O que indica que para volumes de fibra superiores a 17,5% a resistência tenda a baixar, devido a problemas de dispersão das fibras e à fraca molhagem das fibras pela resina o que leva a pouca coesão da matriz com a fibra de reforço. Ainda assim não se excluem problemas com o fabrico da série $V_f=20\%$, pelo que, estes resultados não são conclusivos. Na Tabela 4.2 apresentam-se as equações das curvas e a tensão limite de fadiga.

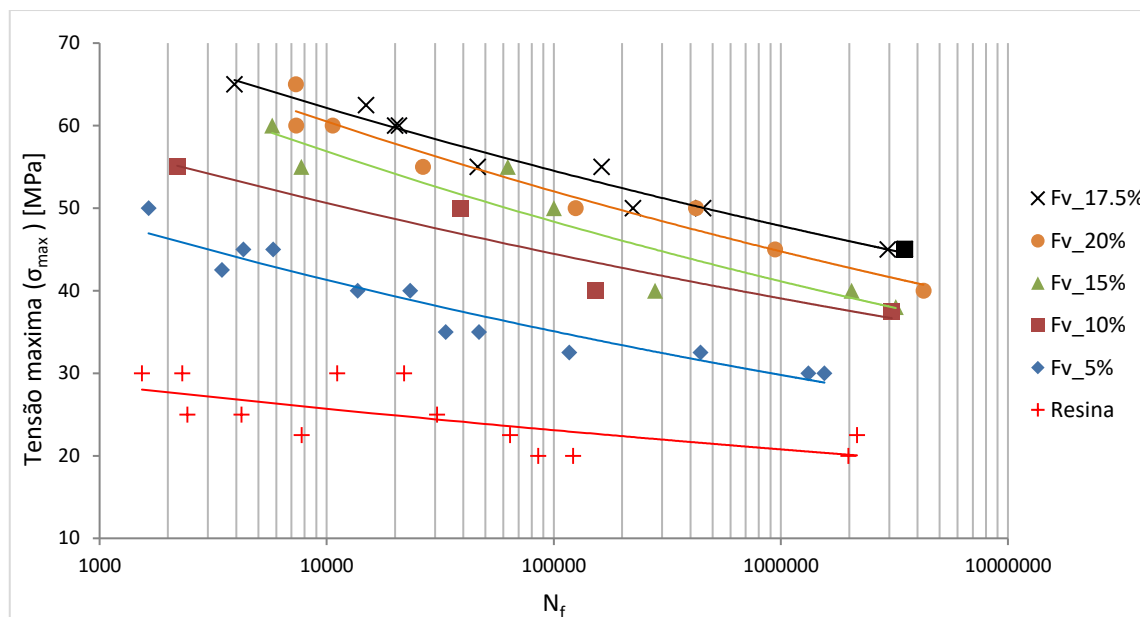


Figura 4.12. Curvas S-N obtidas com os ensaios de fadiga

Tabela 4.2 Resistência à fadiga para 10⁶ ciclos (tensões nominais)

Série	Equação da curva	Tensão para 10 ⁶ ciclos [MPa]	m	R ²
Resina	$\sigma = 39,318N^{-0,046}$	21	0,0537	0,466
Fv = 5%	$\sigma = 108,62N^{-0,07}$	30	0,0709	0,917
Fv = 10%	$\sigma = 85,035N^{-0,056}$	39	0,0563	0,913
Fv = 15%	$\sigma = 108,62N^{-0,07}$	41	0,0703	0,868
Fv = 17,5%	$\sigma = 106N^{-0,058}$	47	0,0633	0,956
Fv = 20%	$\sigma = 119,67N^{-0,091}$	34	0,0654	0,998

Na Figura 4.13 estão representadas três das curvas tensão deformação registadas ao longo do ensaio do provete número 19 da série de 100% resina epóxi. Este ensaio teve a duração de 2163889 ciclos, (um dos ensaios mais longos) e a tensão máxima (σ_{max}) imposta foi de 22,5MPa.

A curva de histerese mais à esquerda (a azul) foi guardada ao fim dos primeiros 1000 realizados, a segunda curva guardada aproximadamente a meio do ensaio e a curva mais à direita é a ultima guardada antes da rutura do provete.

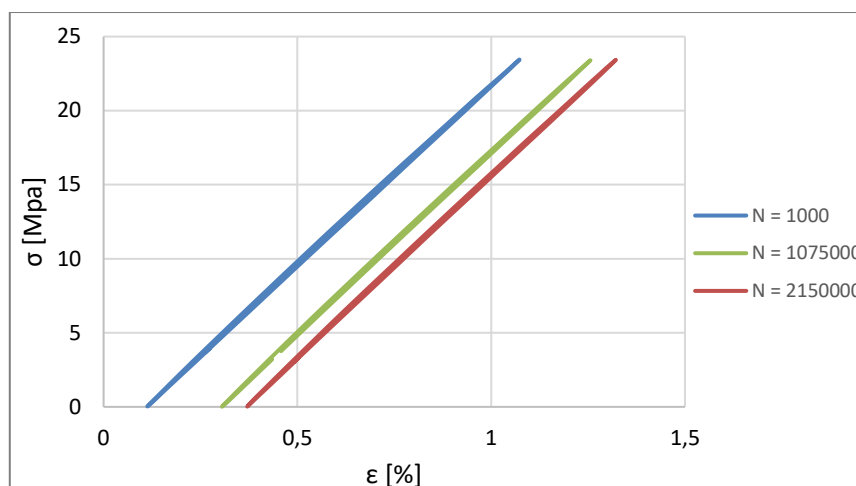


Figura 4.13. Ciclos de histerese do ensaio com $N_R = 2163889$ ciclos $\sigma_{max} = 22,5$ MPa da série 100% resina

Pode observar-se que o declive destas curvas quase não varia, o que indica que existe pouca perda de rigidez (módulo elasticidade E) ao longo do ensaio até à rutura.

A Figura 4.14 é o gráfico da variação do módulo de elasticidade do mesmo ensaio, ou seja, provete número 19 da série de 100% resina epóxi, cujo ensaio teve a duração de $N_R = 2163889$ ciclos e a tensão máxima (σ_{max}) imposta foi de 22,5MPa.

E_d é o módulo de elasticidade dinâmico, calculado ao longo do ensaio. E_{d0} é o módulo de elasticidade dinâmico do provete após este ter completado 1000 ciclos de fadiga, para garantir que o ensaio já está a decorrer numa fase estável. N é o número de ciclos decorridos e N_R número de ciclos para o qual ocorreu a rutura.

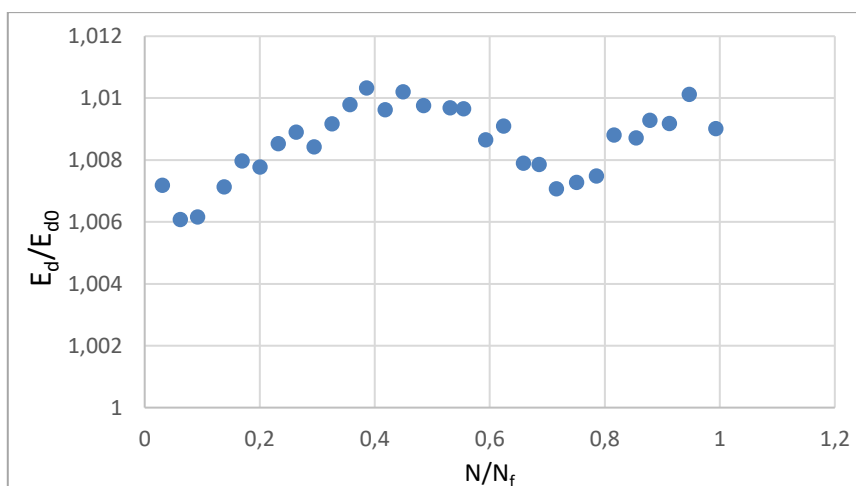


Figura 4.14. Variação do módulo de elasticidade ao longo do ensaio do ensaio com $N_R = 2163889$ ciclos $\sigma_{max} = 22,5$ MPa da série 100% resina

A flutuação que se observa na Figura 4.14, deve-se essencialmente à variação da temperatura da sala onde foi realizado o ensaio. Como o ensaio decorreu ao longo de dois dias, durante a noite a temperatura desce e de dia volta a subir.

Como a matriz do material em estudo é polimérica, com a queda da temperatura o material tende a ganhar rigidez, com o aumento da temperatura ocorre o inverso.

Também para este mesmo ensaio conseguiu-se fazer uma análise da variação energia de histerese. Na Figura 4.15 está representada graficamente essa variação ao longo do ensaio, em que W é a energia de histerese calculada ao longo do ensaio, W_0 é a energia de histerese calculada ao fim de 1000 ciclos decorridos. N é o número de ciclos decorridos e N_R número de ciclos para o qual ocorreu a rutura.

A pesar dos pontos um pouco dispersos, observa-se uma queda mais acentuada da energia de histerese na fase inicial do ensaio (até por volta de 20% da vida) e tende a estabilizar para os restantes 80% da vida.

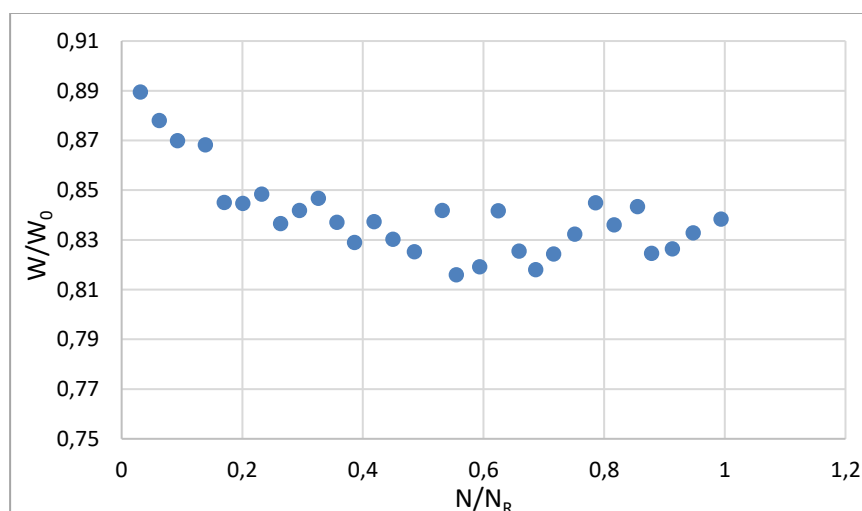


Figura 4.15. Variação da energia de histerese ao longo do ensaio com $N_R = 2163889$ ciclos $\sigma_{max} = 22,5\text{MPa}$ da série 100% resina

Para o caso das séries de material compósito, tanto em ensaios mais curtos e cargas mais altas, como para ensaios mais longos com cargas mais baixas, observa-se uma perda de rigidez ao longo do ensaio, com maior intensidade nos últimos ciclos antes da rutura. Isto deve-se, não à quebra das fibras de reforço, mas sim à perda de coesão entre as fibras e a matriz, ou seja, a matriz desprende-se das fibras e leva à rutura do provete, como que indiciam a imagem do microscópio retirada da superfície de rutura de um provete da

série de 17,5% de volume de fibra cujo ensaio de fadiga teve uma duração de $N_R = 2956860$ e a tensão máxima (σ_{max}) imposta foi de 45MPa (Figura 4.16).

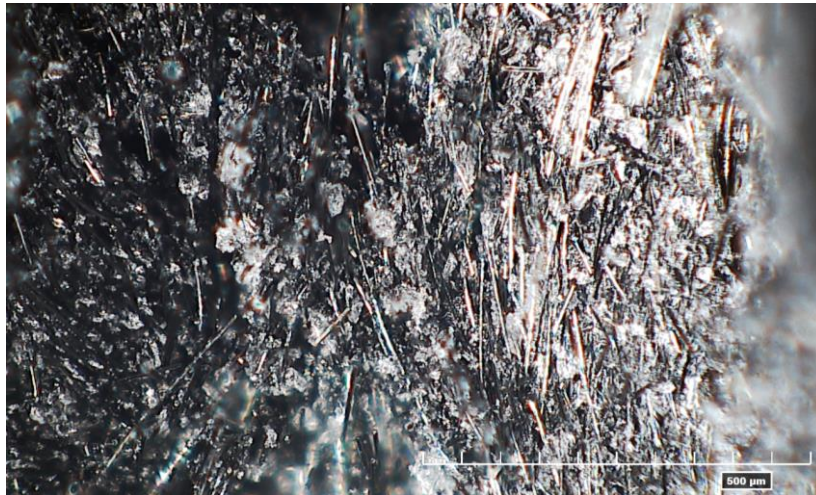


Figura 4.16. Imagem microscopia da superfície de rutura

Na Figura 4.17 estão representadas três das curvas tensão deformação registadas ao longo do ensaio de um provete da série com $V_f = 20\%$. Este ensaio teve a duração de $N_R = 423344$ ciclos, e a tensão máxima (σ_{max}) imposta foi de 50MPa.

A curva de histerese mais à esquerda (a azul) foi guardada ao fim dos primeiros 1000 realizados, a segunda curva guardada aproximadamente a meio do ensaio e a curva mais à direita é a ultima guardada antes da rutura do provete.

Observa-se que o declive da primeira curva (azul) é idêntico à segunda curva (preto), registada a meio do ensaio, havendo uma maior queda de declive na ultima curva registada do ensaio. Isto indica que a maior perda de rigidez se dá para os últimos ciclos do ensaio, como alias se pode verificar mais adiante na Figura 4.19.

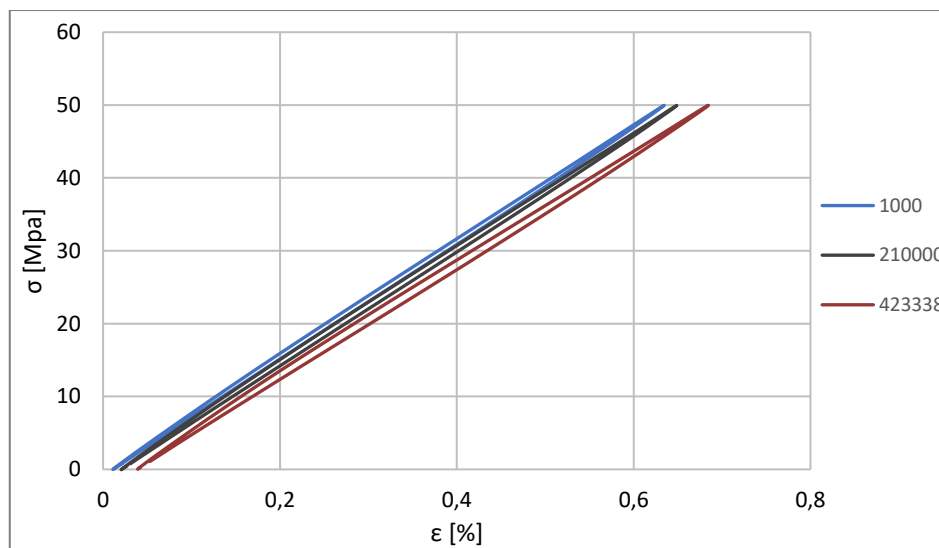


Figura 4.17. Ciclos de histerese do ensaio com $N_R = 423344$ ciclos $\sigma_{max} = 50$ MPa da série $V_f = 20\%$

A Figura 4.18 e a Figura 4.19, representam graficamente a redução do módulo de young ao longo dos ensaios realizados. Ambas as figuras correspondem a ensaios realizados com a série $V_f = 20\%$ mas o ensaio referente à Figura 4.18 teve a duração de $N_R = 7343$ ciclos e a tensão máxima (σ_{max}) imposta foi de 60MPa e o ensaio referente à Figura 4.19 teve a duração de $N_R = 423344$ ciclos e a tensão máxima (σ_{max}) imposta foi de 50MPa.

Como se observa por comparação direta das duas figuras, a perda de rigidez é muito mais acentuada no primeiro ensaio (Figura 4.18) que no segundo ensaio (Figura 4.19), no qual a rigidez vai decaindo ao longo do ensaio, contrariamente ao ensaio anterior, em que grande parte da perda de rigidez se dá nos últimos ciclos do ensaio. Isto deve-se ao facto da tensão máxima aplicada no primeiro ensaio ser muito alta, próxima da tensão de rutura da resina usada como matriz no material compósito. Com tensões altas, o dano ocorre de forma mais acelerada, uma vez que se dá perda de coesão da matriz com a fibra e mesmo rutura da matriz.

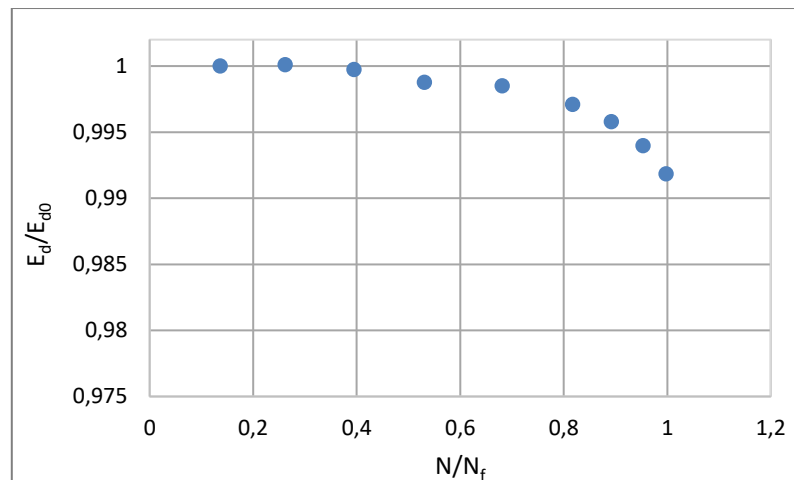


Figura 4.18. Perda de rigidez ao longo do ensaio de fadiga ($\sigma_{\max}=60$ MPa; $N_R=7343$ ciclos; serie Vf=20%)

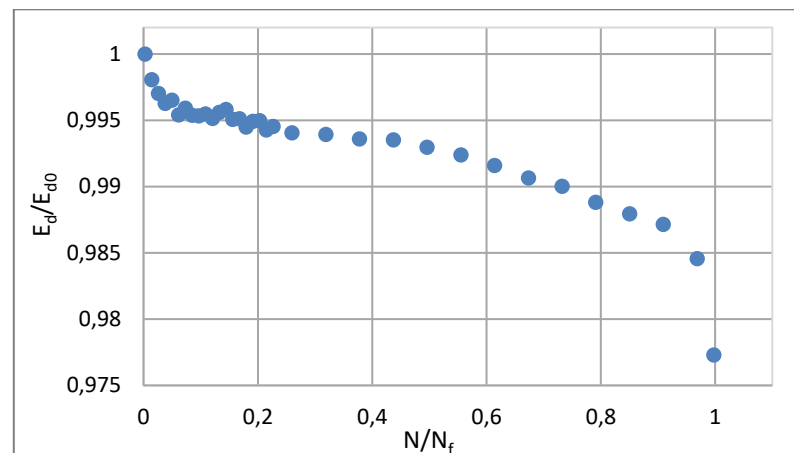


Figura 4.19 Perda de rigidez ao longo do ensaio de fadiga ($\sigma_{\max}=50$ MPa; $N_R= 423344$ ciclos; serie Vf=20%)

Contrariamente ao que acontece com a série de 100% resina, em que a energia despendida por histerese tende a diminuir ao longo do ensaio, nos ensaios dos materiais compósitos, a energia despendida por histerese tende a aumentar ao longo do ensaio, tendo um aumento mais acentuado nas fases inicial e final do ensaio, como se pode observar na Figura 4.20, que corresponde a um ensaio a um provete da série com Vf=20%, que teve a duração de $N_R= 423344$ ciclos e tensão máxima (σ_{\max}) imposta de 50 MPa .

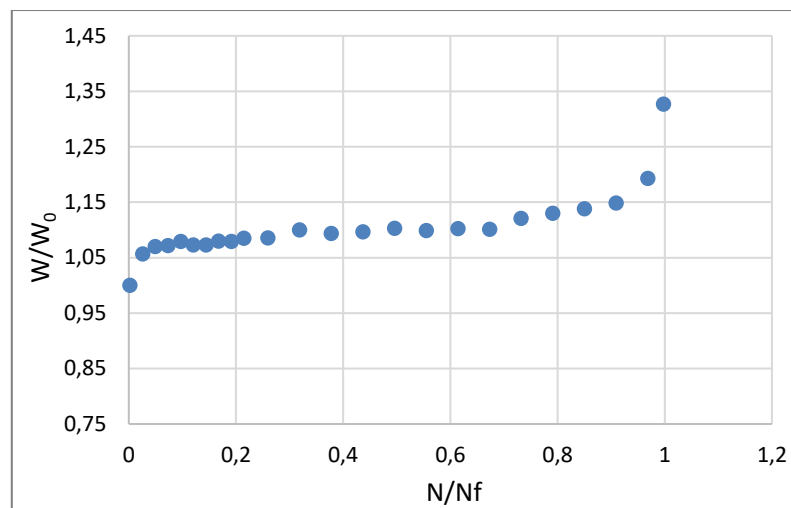


Figura 4.20 Variação da energia de histerese ao longo do ensaio com $N_R = 423344$ ciclos $\sigma_{max} = 50\text{MPa}$ da série com $V_f = 20\%$

Para controlo de qualidade dos provetes, como já referido anteriormente, foram usadas medições de rugosidade (R_a , R_z), bem como a densidade de cada provete, de modo a por comparação de resultados entre ensaios, perceber de que maneira é que cada um destes parâmetros afetam o comportamento à fadiga.

Da Figura 4.21 à Figura 4.23, os pontos a vermelho representam os provetes cujos ensaios foram considerados válidos e por isso fazem parte das curvas S-N traçadas, estão então, incluídos na gama de desvios considerada aceitável $[-0,7; 1,75]$. Aos pontos a azul correspondem aos provetes cujos ensaios foram considerados não válidos por terem obtido um número de ciclos de rutura inferior ao expectável para cada série. Para calcular o desvio, foi determinada a equação da curva S-N de cada série de volume de fibra. Com a equação da curva S-N foi calculada o número de ciclos esperado para a carga aplicada em cada ensaio. O desvio (D) corresponde então à diferença entre o número de ciclos de rutura N_R e número de ciclos esperado para o ensaio (N_E), como indica a equação (4.1).

$$D = \frac{N_R - N_E}{N_E} \quad (4.1)$$

Os gráficos da Figura 4.21 revelam que existe alguma relação entre a densidade do provete e a sua resistência à fadiga. Os provetes com maior densidade têm menos defeitos, tendo assim um valor para o desvio dentro da gama que se considera aceitável e assim sendo, a resistência à fadiga enquadra nos valores obtidos para os restantes ensaios da série.

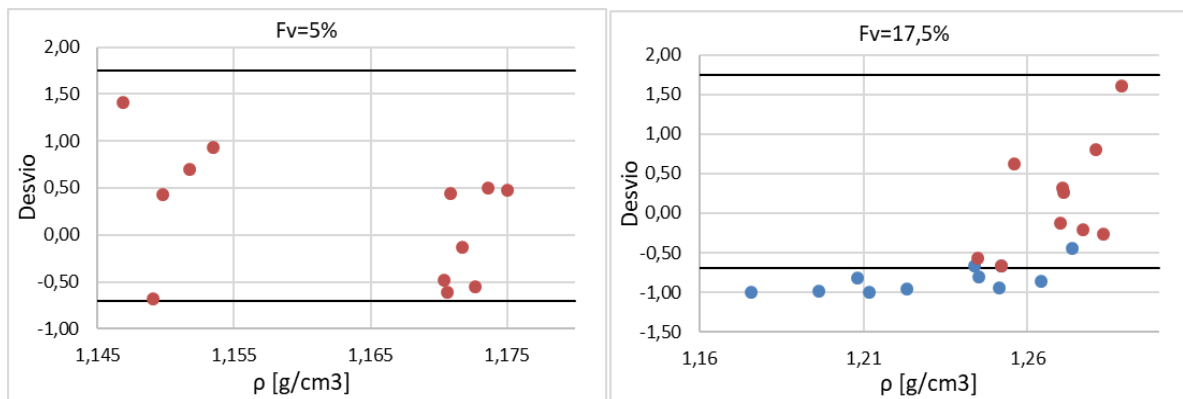


Figura 4.21 Variação do desvio com a densidade (Fv =5% e Fv=17,5%)

A Figura 4.22 e a Figura 4.23, mostram o efeito do acabamento superficial de cada provete na resistência à fadiga do material. Como se pode observar, para os valores de rugosidade ensaiados, não é evidente uma relação entre o acabamento superficial e a resistência à fadiga. Isto é, os pontos a vermelho (considerados validos) têm valores de rugosidade distribuídos por toda a gama de rugosidades ensaiadas.

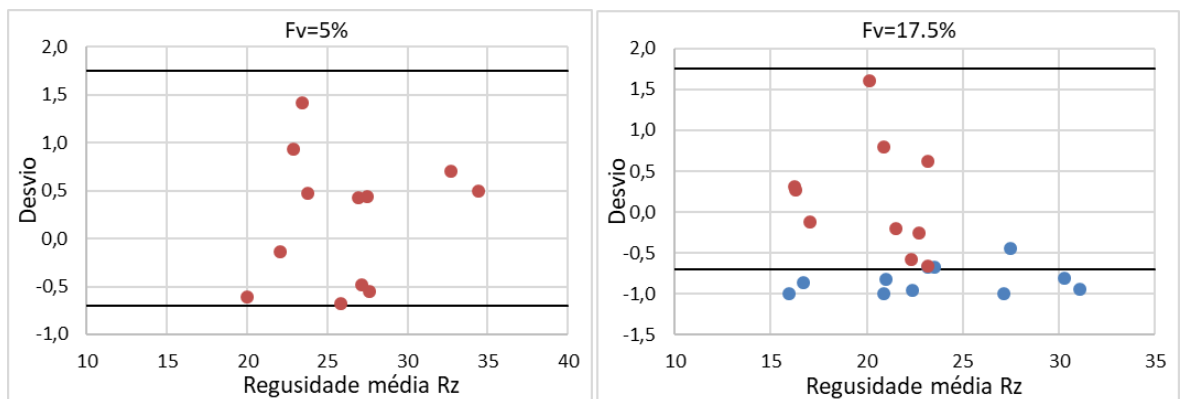


Figura 4.22. Vadição do desvio com a rugosidade R_z (Vf =5% e Vf=17,5%)

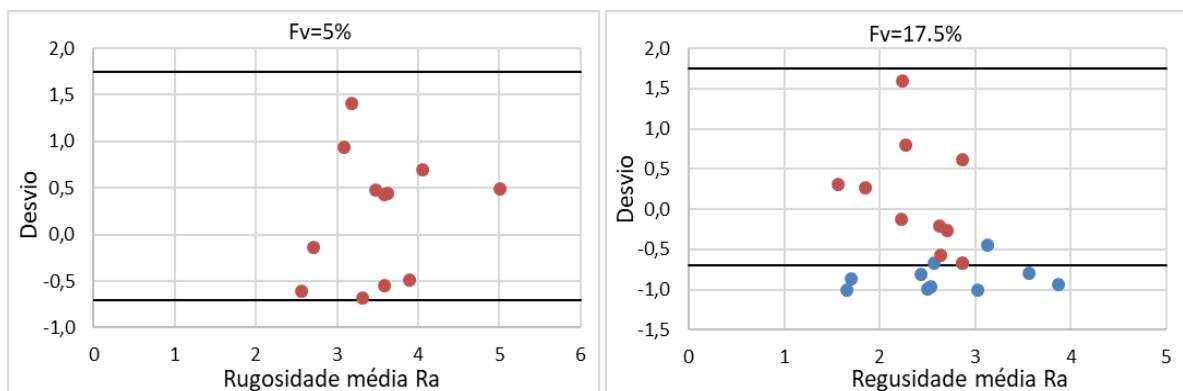


Figura 4.23. Vadição do desvio com a rugosidade R_a (Vf =5% e Vf=17,5%)

Da análise dos gráficos da Figura 4.21, Figura 4.22 e Figura 4.23 conclui-se que:

- A resistência à fadiga é muito prejudicada por variações na densidade, provocadas por defeitos internos, como porosidades, má distribuição da fibra e pouca coesão entre a matriz e a fibra;

- Para os valores de rugosidade ensaiados, não se verifica qualquer efeito na resistência à fadiga.

5. CONCLUSÃO

Foi desenvolvido um estudo com o objetivo de analisar o comportamento à fadiga de compósitos de fibra moída carbono/epóxi, para as diferentes percentagens de volume de fibra, (5%,10%,15%,17,5%, 20% e 100% resina).

O trabalho desenvolvido permite tirar algumas conclusões importantes:

- A resistência à tração e à fadiga aumenta quase linearmente com o aumento da percentagem de fibra curta de carbono.

- As curvas S-N das séries de compósito ensaiadas revelam que todas elas têm um comportamento à fadiga idêntico, tendo as curvas declives idênticos. No entanto, aos declives destas curvas S-N é superior ao da curva S-N resultante dos ensaios de fadiga da série de resina epóxi (material usado na matriz do material compósito).

- Os defeitos internos, como má dispersão de fibras, falta de coesão matriz fibra e porosidades, tem um efeito muito prejudicial na resistência do material.

- A resina epóxi usada como matriz do material compósito tem um comportamento típico de fratura dúctil, ou seja, a rutura ocorre com significativa deformação plástica. Apresenta também baixo módulo de elasticidade e um valor de deformação na rutura, comparativamente alto relativamente ao material compósito. Com a adição da fibra de carbono à resina epóxi observou-se um grande aumento dos valores das propriedades mecânicas como o módulo de elasticidade e tensão de rutura.

- Tanto em ensaios com tensão máxima de ciclo elevada, como para ensaios com tensões máximas baixas, a resina epóxi apresenta pouca perda do módulo de elasticidade ao longo do ensaio, esta redução é, no entanto, mais evidente nas séries com maior percentagem volúmica de fibra.

- Foi também calculada a área delimitada pelo gráfico das curvas de histerese traçadas ao longo dos ensaios de forma a avaliar o dano provocado por fadiga. No entanto estes resultados são muito pouco conclusivos, devido ao escasso número de resultados obtidos.

- A queda na resistência à fadiga da série $V_f = 17,5\%$ para a série $V_f = 20\%$ deve-se talvez a problemas como má dispersão da fibra ou/e má cura da resina usada para produzir os provetes da série $V_f = 20\%$.

Deixa-se assim, como sugestão para trabalhos futuros, a realização de mais ensaios para uma análise mais consistente da influência da porosidade na resistência à fadiga, assim como a realização de ensaios para séries com volumes de fibra superiores a 20%, de modo a apurar se há espaço para melhoria de propriedades. Seria interessante também realizar ensaios de fadiga a estes materiais compósitos variando o acabamento superficial, para entender a influência deste parâmetro na resistência à fadiga.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Avanzini, A. et al., 2013. Fatigue behavior and cyclic damage of peek short fiber reinforced composites. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), pp.397–406. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836812003915> [Accessed March 14, 2017].
- Avanzini, A., Donzella, G. & Gallina, D., 2011. Fatigue damage modelling of PEEK short fibre composites. *Procedia Engineering*, 10, pp.2052–2057. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.340>.
- Borrego, L.P. et al., 2014. Fatigue behaviour of glass fibre reinforced epoxy composites enhanced with nanoparticles. *Composites Part B*, 62, pp.65–72. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.02.016>.
- Fu, S.-Y. & Lauke, B., 1998. Fracture resistance of unfilled and calcite-particle-filled ABS composites reinforced by short glass fibers (SGF) under impact load. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 29(5–6), pp.631–641. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359835X97001115> [Accessed August 21, 2017].
- Jin, H. et al., 2011. Fracture and fatigue response of a self-healing epoxy adhesive. *Polymer*, 52(7), pp.1628–1634. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S003238611100108X> [Accessed August 19, 2017].
- Kawai, M. et al., 2017. Effects of temperature and stress ratio on fatigue life of injection molded short carbon fiber-reinforced polyamide composite. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 98, pp.9–24. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359835X17301033> [Accessed August 21, 2017].
- Kuriger, R.J. et al., 2002. Processing and characterization of aligned vapor grown carbon fiber reinforced polypropylene. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(1), pp.53–62. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359835X01000707> [Accessed August 19, 2017].
- Levita, G. et al., 1991. Crosslink density and fracture toughness of epoxy resins. *Journal of Materials Science*, 26(9), pp.2348–2352. Available at: <https://doi.org/10.1007/BF01130180>.
- Mao, H. & Mahadevan, S., 2002. Fatigue damage modelling of composite materials. *Composite Structures*, 58(4), pp.405–410.
- Matei, S., Stoicanescu, M. & Crisan, A., 2016. Composites with Short Fibers Reinforced Epoxy Resin Matrix. *Procedia Technology*, 22, pp.174–181. Available

- at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017316000426>.
- Mortazavian, S. & Fatemi, A., 2015a. Fatigue behavior and modeling of short fiber reinforced polymer composites: A literature review. *International Journal of Fatigue*, 70, pp.297–321. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2014.10.005>.
- Mortazavian, S. & Fatemi, A., 2015b. Fatigue behavior and modeling of short fiber reinforced polymer composites including anisotropy and temperature effects. *International Journal of Fatigue*, 77, pp.12–27. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.02.020>.
- Mortazavian, S. & Fatemi, A., 2017. Fatigue of short fiber thermoplastic composites: A review of recent experimental results and analysis. *International Journal of Fatigue*, 102, pp.171–183. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142112317300464> [Accessed August 21, 2017].
- Pathak, A.K. et al., 2016. Improved mechanical properties of carbon fiber/graphene oxide-epoxy hybrid composites. *Composites Science and Technology*, 135, pp.28–38. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0266353816303967> [Accessed March 16, 2017].
- Smith, W.F. (University of C.F., 1998. *Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais* 3rd ed.,
- Yue, C. & Hu, X., 2000. Tensile properties of short-glass-fiber- and short-carbon-fiber-reinforced polypropylene composites. , 31, pp.1117–1125.