



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

André Bastos dos Santos

**RESISTÊNCIA À FADIGA DE POLICARBONATO  
REFORÇADO COM FIBRAS DE CARBONO**

**Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, no ramo de Projeto Mecânico orientada pelo Professor Doutor Paulo Nobre Balbis dos Reis e pelo Professor Doutor José António Martins Ferreira e apresentada no Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra.**

Fevereiro de 2023



1 2



9 0

FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

# **Resistência à fadiga de policarbonato reforçado com fibras de carbono**

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

## **Fatigue resistance of polycarbonate reinforced with carbon fibers**

**Autor**

**André Bastos dos Santos**

**Orientadores**

**Paulo Nobre Balbis dos Reis**

**José António Martins Ferreira**

**Júri**

<b>Presidente</b>	<b>Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa</b> <b>Professor Catedrático da Universidade de Coimbra</b>
<b>Orientador</b>	<b>Professor Doutor Paulo Nobre Balbis dos Reis</b> <b>Professor Associado da Universidade de Coimbra</b> <b>Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes</b>
<b>Vogal</b>	<b>Professor Associado com Agregação da Universidade de Coimbra</b>

**Coimbra, fevereiro, 2023**



“Um cientista pode não ter a certeza da resposta, mas muitas vezes tem a certeza que  
pode encontrar uma.”

B. F. Skinner



## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar, aos meus orientadores, o meu reconhecimento e agradecimento aos Professores Doutores Paulo Nobre e Martins Ferreira, pela atenção e disponibilidade para esclarecerem as minhas dúvidas e pelos ensinamentos prestados ao longo do decurso desta dissertação.

Aos meus colegas e amigos, pela partilha de experiências, conhecimentos e motivação ao longo da prática do curso.

E, por fim, o meu sentido agradecimento a todas as pessoas que, de alguma maneira, contribuíram para a concretização desta Dissertação, nomeadamente, à minha família, os meus pais, João Santos e Ana Clara Bastos pelo afeto, apoio, compreensão e confiança que depositaram em mim, e à minha irmã, Daniela Santos pelos conselhos, disponibilidade e encorajamento ao longo das diversas etapas desta desafiante viagem.





## Resumo

No setor aeronáutico, os componentes das aeronaves, sejam tripuláveis ou não, estão sempre a ser confrontados com variações cíclicas de cargas. Estas, podem danificar a sua estrutura e, conseqüentemente, reduzir a sua vida útil. Assim, a presente dissertação tem como objetivo caracterizar o comportamento de materiais como o policarbonato (PC) e policarbonato reforçado com fibras de carbono (PCCF), impressos por fabrico aditivo, neste caso, por *Fused Deposition Modeling* (FDM), com vista a testar estes materiais a cargas estáticas e dinâmicas.

PC e PCCF foram impressos numa impressora 3D, por FDM, com variáveis de impressão já otimizadas por estudos anteriores realizados na Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra (FCTUC). Estes materiais foram caracterizados a partir de ensaios à tração e à fadiga, onde se identificaram as respetivas resistências à tração, rigidez e vida à fadiga. A adição de fibras de carbono a PC provou ser significativamente positiva para a rigidez e vida à fadiga, todavia, a fraca ligação entre a matriz e o reforço provou ser um obstáculo para a obtenção de uma resistência à tração superior. Além disso, efetuou-se tratamentos térmicos de durações distintas, assim como variou-se as frequências de carga cíclica, de maneira a testar o comportamento dos materiais em diferentes situações de atividade. Estes testes demonstraram que o recozimento tem uma influência positiva nas propriedades, contudo, as variáveis deste tratamento devem ser revistas, de forma a aprimorar os resultados para o material PC. O aumento da frequência nos ensaios mostra ser favorável para o aumento da vida à fadiga para ambos os materiais. No entanto, no uso de frequências de valor maior, deve-se ter em atenção o possível efeito de autoaquecimento do material.

**Palavras-chave:** Fabrico aditivo, *Fused Deposition Modeling* (FDM), Policarbonato (PC), Policarbonato reforçado com fibra de carbono (PCCF), Fadiga.



## Abstract

In the aeronautical sector, aircraft components, whether manned or unmanned, are always being confronted with cyclical variations in loads. These can damage their structure and, consequently, reduce their service life. Thus, this dissertation aims to characterize the behavior of materials such as polycarbonate (PC) and polycarbonate reinforced with carbon fiber (PCCF), printed by additive manufacturing, in this case, by Fused Deposition Modeling (FDM), in order to test these materials to static and dynamic loads.

PC and PCCF were printed in a 3D printer, by FDM, with printing variables already optimized by previous studies conducted at the Faculty of Science and Technology of the University of Coimbra (FCTUC). These materials were characterized from tensile and fatigue tests, where their tensile strength, stiffness and fatigue life were identified. The addition of carbon fibers to PC proved to be significantly positive for stiffness and fatigue life, however, the weak bond between the matrix and the reinforcement proved to be an obstacle to obtain a higher tensile strength. In addition, heat treatments of different durations were performed, as well as varying the cyclic loading frequencies, in order to test the behavior of the materials in different activity situations. These tests showed that annealing has a positive influence on the properties, however, the variables of this treatment should be reviewed in order to improve the results for the PC material. Increasing the frequency in the tests shows to be favorable for increasing the fatigue life for both materials. However, when using higher value frequencies, attention should be paid to the possible self-heating effect of the material.

**Keywords:** Additive manufacturing, Fused Deposition modeling (FDM), Polycarbonate (PC), Polycarbonate reinforced with carbon fibre (PCCF), Fatigue.



---

## Índice

Índice de Figuras .....	viii
Índice de Tabelas .....	x
Simbologia e Siglas .....	xi
Simbologia.....	xi
Siglas .....	xi
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Contextualização.....	1
1.2. Objetivos e motivação .....	2
2. Revisão da literatura .....	5
2.1. Fabrico aditivo .....	5
2.1.1. <i>Fused Deposition Modeling</i> (FDM) .....	6
2.1.2. Compósitos e materiais de engenharia .....	7
2.2. Fadiga.....	10
2.2.1. Fadiga em compósitos poliméricos fabricados por FDM.....	12
2.2.2. Efeito da frequência.....	14
2.2.3. Efeito do recozimento.....	15
3. Procedimento experimental .....	17
3.1. Materiais .....	17
3.1.1. Parâmetros de impressão .....	17
3.1.2. Provetes .....	17
3.1.3. Especificação dos materiais.....	19
3.2. Ensaio.....	19
3.2.1. Ensaio de tração .....	20
3.2.2. Ensaio de fadiga .....	21
3.2.3. Scanning Electron Microscope (SEM).....	22
4. Apresentação e discussão de resultados .....	23
4.1. Análise à tração.....	23
4.1.1. Recozimento .....	24
4.2. Análise à fadiga .....	25
4.2.1. Recozimento .....	27
4.2.2. Efeito da Frequência.....	28
4.3. Análise SEM .....	30
5. Conclusão .....	33
5.1. Sugestões para trabalhos futuros.....	34
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	35

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Exemplo de impressão 3D por FDM (adaptado de [8]).....	6
Figura 2.2. Comparação da força específica de vários materiais (adaptado de [17]). .....	9
Figura 2.3. Curva tensão-deformação com a variação de concentração das fibras de carbono (adaptado de [19]). .....	10
Figura 2.4. Ciclo de tensão constante (adaptado de [22]). .....	10
Figura 2.5. Ciclo de tensão aleatória (adaptado de [22]). .....	11
Figura 2.6. Típica curva S-N (adaptado de [23]). .....	11
Figura 3.1. Geometria e dimensão dos provetes usados neste estudo: $L=160\text{mm}$ e $L_0=80\text{mm}$ . .....	18
Figura 3.2. Máquina de ensaio à tração SHIMADZU AGS – X.....	20
Figura 3.3. Máquina servo-hidráulica Dartec usada nos ensaios de fadiga. ....	21
Figura 3.4. a) Equipamento de revestimento <i>Cressington 108 Sputter Coater</i> ; b) Microscópio <i>Hitachi SU3800</i> .....	22
Figura 4.1. Curva tensão-deformação de controlo de PC e PCCF, à frequência de 5 Hz...	23
Figura 4.2. Curvas tensão-deformação para as diferentes condições de recozimento: a) Para o PC; b) Para o PCCF. ....	24
Figura 4.3. PC e PCCF a diferentes condições de recozimento: a) Evolução da resistência mecânica; b) Rigidez à tração. ....	25
Figura 4.4. Curvas S-N de controlo de PC e PCCF, à frequência de 5 Hz. ....	26
Figura 4.5. Variação da rigidez ao longo da vida de fadiga, à frequência de 5 Hz e 0 horas de recozimento, para: a) O Policarbonato sujeito a diferentes percentagens da carga máxima; b) O Policarbonato e Policarbonato reforçado com fibra de carbono sujeito a uma carga média de 20% e 50%, respetivamente.....	27
Figura 4.6. Vida à fadiga, à frequência de 5 HZ, submetida a vários tempos de recozimento de: a) PC; e b) PCCF.....	27
Figura 4.7. Variação da carga para várias frequências (adaptado de [48]). .....	29
Figura 4.8. Efeito da frequência na vida à fadiga: a) Para o PC; b) Para o PCCF. ....	29
Figura 4.9. Análise SEM do efeito do recozimento nos provetes de PC a a) controlo, escala 1:80; b) 2 horas, escala 1:95; c) 4 horas, escala 1:85; d) 8 horas, escala 1:140; e e) 16 horas, escala 1:95. ....	30
Figura 4.10. Análise SEM do efeito do recozimento nos provetes de PCCF a a) controlo, escala 1:120; b) 2 horas, escala 1:95; c) 4 horas, escala 1:120; d) 8 horas, escala 1:110; e e) 16 horas, escala 1:140. ....	31

Figura 4.11. Análise SEM do efeito do recozimento no provete de PCCF de controlo, escala 1:190. .... 32

Figura 4.12. Análise SEM do efeito do recozimento nos provetes de PCCF a 16 horas de recozimento, escala 1:140. .... 32

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Parâmetros de impressão dos provetes de PC e PCCF.....	17
Tabela 3.2. Propriedades do material PC fornecido pela empresa 3DXTECH (adaptado de [46]).....	19
Tabela 3.3. Propriedades do material PCCF fornecido pela empresa 3DXTECH (adaptado de [47]).....	19
Tabela 4.1. Comparação do aumento dos valores em percentagem, de PC e PCCF, da tensão máxima e rigidez submetidos a recozimento, aos valores de controlo.....	25



## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$\sigma$  – Tensão

$N_r$  – Número de reversões até à falha

$\sigma_a$  – Amplitude de tensão

$\sigma_{máx}$  – Tensão máxima

$\sigma_{min}$  – Tensão mínima

$R$  – Razão de tensões

$F$  – Força

$A_s$  – Área da secção

$E$  – Rigidez

$\Delta\sigma$  – Variação da tensão

$\Delta\varepsilon$  – Variação da deformação

$\varepsilon_e$  – Deformação elástica

### Siglas

PC – Policarbonato

PCCF – Policarbonato reforçado com fibras de carbono

FDM – Fused deposition modeling

ABS – Acrilonitrila butadieno estireno

PP – Polipropileno

PEEK – Poli (éter-éter-cetona)

PA – Poliamida

CAD – Computer-aided design

CAM – Computer-aided manufacturing

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

SEM – Scanning Electron Microscope



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Contextualização

Desde o princípio da indústria dos meios de transportes, que a necessidade de materiais de alto desempenho foi uma prioridade. A exigência desta indústria vem da necessidade de materiais de elevada resistência e dureza, relativamente ao peso próprio do material. Inicialmente, esta imposição vinha, principalmente, da baixa eficácia dos primeiros motores. O primeiro carro a ser patenteado foi de Carl Benz em 1886, com uma potência de 0,55 kW e um peso de cerca de 650 kg. Este conseguia alcançar uma velocidade máxima de 16 km/h [1]. Com o crescimento do mercado implementou-se mais regras de segurança e tecnologia, todavia, a competição das marcas por maiores velocidades sempre foi dos primordiais objetivos, visto que era uma das maneiras de o público perceber quem manufacturava os “melhores” carros. Assim, quando existia ausência de evolução por parte da área dos motores, a solução para obter maiores velocidades estava em materiais mais leves de alto desempenho. Porém, atualmente, a motivação da procura de materiais de alto desempenho para o uso em meios de transporte encontra-se no aumento da eficácia do transporte, de modo a diminuir a pegada ambiental e recursos económicos dispensados. Por outro lado, estes tipos de materiais de boa razão rigidez-densidade também permitem o aumento de espaço útil do transporte e, por consequência, o conforto dos passageiros.

Esta evolução de materiais de engenharia veio a acompanhar o avanço de outros métodos de produção, no qual, o fabrico aditivo, veio a ganhar elevada importância, principalmente nesta última década. Este processo veio contradizer os métodos tradicionais de produção que envolviam sempre subtração de material da matéria-prima para originar uma peça. Assim, o fabrico aditivo é um processo de impressão 3D, em que se imprime objetos, através da sobreposição progressiva de um material em camadas. Esta evolução tecnológica de fabrico aditivo começou na década de 1980 com o Dr. Hideo Kodama, que produziu um sistema de prototipagem rápida e, com Charles Hull, a estereolitografia. Estes e outros métodos de manufatura aditiva foram desenvolvidos ao longo dos anos e, entre estes, o processo de *Fused Deposition Modeling* (FDM) [2]. Contudo, apesar da evolução tecnológica dos materiais de engenharia, estes ainda necessitam de contínuo estudo, de maneira a terem uma utilidade mais predominante na indústria. Por outro lado, com a

evolução do fabrico aditivo, FDM, tornou-se uma das técnicas mais memoráveis, tanto a nível industrial como particular, visto que os preços de produção destas máquinas tornaram-se significativamente acessíveis aos consumidores. Deste modo, a manufatura aditiva veio permitir liberdade de desenho do projeto, possibilitando geometrias interiores complexas, diminuição do material e componentes necessários, assim como desperdício de matéria-prima e prototipagem rápida, sem a exigência de despender elevados recursos monetários.

Agregando estes conceitos de materiais de engenharia e fabrico aditivo, foi crescendo exponencialmente o interesse dos diversos setores industriais por este tipo de tecnologia. Um destes setores é o aeronáutico, visto que existe elevada exigência pela eficácia dos veículos, tanto estruturalmente como a nível ambiental.

Assim, o estudo de materiais como o policarbonato (PC) e policarbonato reforçado com fibras de carbono (PCCF) produzidos por fabrico aditivo é interessante visto que o policarbonato tem elevada resistência ao impacto, dureza, é isolador elétrico e é retardante de chama, o que é importante nos materiais para uso nos vários tipos de meios de transporte. Por outra perspetiva, a adição de fibras de carbono ao policarbonato irá proporcionar capacidades estruturais superiores ao policarbonato, aumentando o desempenho do material e a probabilidade de ser utilizado em situações de alto desempenho. Sendo assim, estes materiais apresentam a possibilidade de exibir boas propriedades mecânicas aquando fabricados por impressão 3D, o que será interessante estudar tendo em conta que o uso de fabrico aditivo é maioritariamente utilizado para protótipos.

## **1.2. Objetivos e motivação**

O propósito deste estudo encontra-se na análise dos materiais PC e PCCF e na investigação do seu desempenho à fadiga. Assim, pretende-se averiguar o efeito da adição de fibras de carbono, como material de desempenho estrutural, a um polímero, por forma a originar um compósito de características superiores e, desta maneira, continuar o estudo de potenciais materiais de elevado desempenho. Então, posto isto, planeia-se estudar o comportamento à fadiga, assim como algumas propriedades como a tensão de rutura e rigidez, tanto de PC como PCCF. Por outro lado, independentemente de ser um material compatível com os tipos de desempenhos pretendidos, este estudo pode contribuir para componentes que necessitem de outro intervalo de desempenho. Da mesma maneira que no

desporto de fórmula 1, nem todos os desenvolvimentos são aproveitados para o desporto, mas podem, no entanto, ter utilidade e aproveitamento num carro comum.



## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. Fabrico aditivo

O setor industrial encontra-se constantemente em competição e inovação. A pressão competitiva das marcas leva à contínua evolução dos métodos de trabalho, assim como os de produção. As empresas que não se adaptam correm o risco de ficar para trás, sendo que, atualmente, o novo método de produção a acomodar é fabrico aditivo.

O fabrico aditivo surgiu no princípio da década de 1980, onde Dr. Hideo Kodama desenvolveu uma máquina de prototipagem rápida. Mais tarde, Charles Hull inventou o outro modo de impressão 3D, a estereolitografia, e em seguida, estabeleceu a sua empresa. Após a comercialização da sua primeira impressora 3D, outros investigadores tentaram desenvolver o seu método de manufatura aditiva, como a sinterização seletiva a laser e, posteriormente, mais frequentemente utilizado na atualidade, FDM [2].

Inicialmente, a tecnologia de impressão 3D era predominantemente utilizada para a realização de protótipos num curto espaço de tempo e a baixo custo, o que previamente não se verificava com a realização de moldes para testar protótipos [3]. Recentemente, com a evolução de materiais de engenharia, como acrilonitrila butadieno estireno (ABS), polipropileno (PP), poli-éter-éter-cetona (PEEK) e poliamida (PA), ou seja, materiais leves e resistentes, com a adição de reforços como fibra de carbono, vidro ou kevlar, conduziu à maior possibilidade destas tecnologias de manufatura aditiva serem utilizadas para áreas de suporte de cargas como a área automóvel e aeronáutica [4].

Neste sentido, ao acomodar este novo método de processamento de fabrico aditivo para o setor aeronáutico, este dispõe de vantagens consideráveis, visto que, esta técnica permite aos projetistas e engenheiros liberdade de redesenhar estruturas internas com componentes altamente complexos, resultando na produção do mesmo componente, mas com a necessidade de menor número de peças. Isto permite, por um lado, diminuir os recursos financeiros e tempo necessário para a produção dos referidos componentes e, por outro, decresce a probabilidade de modos de falha visto que reduz o número de soldaduras. Um exemplo do estudo em causa, reduziu o número de peças de um bocal de combustível da turbina a jato de 20 para 1, originando, assim, uma redução de peso de 25 %, de tempo de produção, e eliminação de despesas com múltiplos fornecedores [5].

Nesta perspectiva, este estudo pretende caracterizar os materiais PC e PCCF e obter as curvas de fadiga para solicitações a amplitude de carga constante, com vista a estabelecer previsões das vidas de fadiga.

### 2.1.1. Fused Deposition Modeling (FDM)

FDM é um processo de fabrico aditivo em que um filamento proveniente de uma bobina é extrudido a uma temperatura em que o material termoplástico se encontra no estado fundido. Este material é adicionado a uma cama de impressão num plano 2D. Subsequentemente, a completar uma camada, existe um movimento relativo entre a cabeça de extrusão e a cama de impressão, de modo a conceder à peça a terceira dimensão, como se pode ver na figura 2.1. Assim, esta peça é modelada, camada a camada, a partir da informação fornecida pelo *slicing software*. Este programa traduz o modelo CAD/CAM da peça para um plano 2D para a impressora 3D, permitindo, assim, imprimir geometrias complexas camada a camada [6], [7].

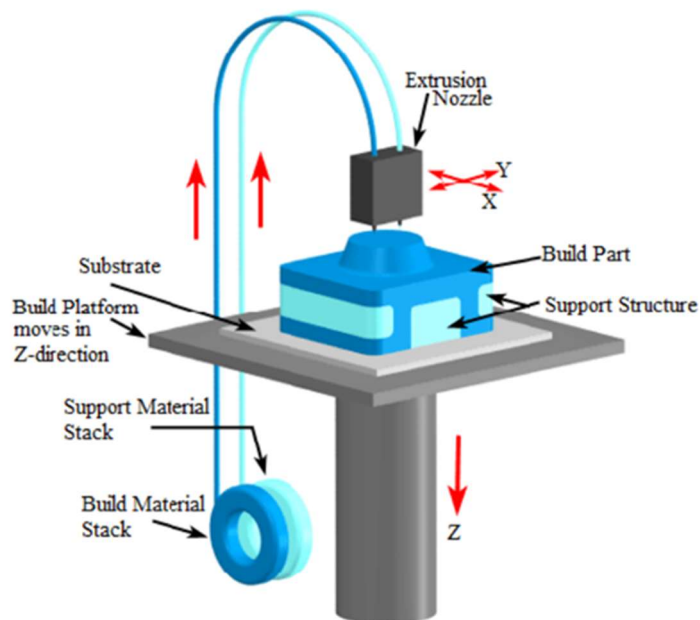


Figura 2.1. Exemplo de impressão 3D por FDM (adaptado de [8]).

O uso desta tecnologia iniciou-se, predominantemente, no setor de pesquisa e desenvolvimento para realização de protótipos possibilitando prototipagem mais rápida, geometrias de componentes com maior complexidade e custos baixos relativamente aos



métodos mais tradicionais de manufatura subtrativa, como por exemplo, torneamento, fresagem. Assim, este método permite uma produção mais amigável ao meio ambiente, diminuindo a poluição sonora e ambiental, através de aproveitamento significativamente superior percentual da matéria-prima [9]. Por outro lado, o uso de técnicas de impressão 3D, como FDM, tem um elevado tempo de manufatura, o que é prejudicial quando se pretende o uso desta técnica num setor que necessita de elevado volume de produção [10].

O tipo de material utilizado para esta técnica são os materiais termoplásticos, dado que FDM permite apenas o uso deste tipo de polímeros, com a particularidade de serem reprocessáveis [11]. Um dos principais elementos usados com os materiais termoplásticos é o emprego de fibras de carbono como reforço. Estes tipos de compósitos possibilitaram a melhoria das propriedades mecânicas a baixa densidade, associada à produção por FDM. Desta forma, esta técnica permite a manufatura de componentes de geometria complexa e faz com que estes materiais sejam candidatos realistas para a substituição de materiais convencionais e produção de componentes para setores de elevado desempenho, o que possibilita o aumento da competitividade no mercado [12].

### **2.1.2. Compósitos e materiais de engenharia**

Materiais compósitos são materiais que são formados por dois ou mais materiais, de modo a criar um material personalizado ao desempenho requerido de características superiores. Geralmente, estes são constituídos por uma matriz e um reforço. As matrizes podem ser constituídas de materiais metálicos, cerâmicos ou poliméricos. No caso em estudo, meios de transporte aéreo, os compósitos de matriz polimérica são bastante utilizados devido à sua elevada resistência e rigidez específica relativamente às matrizes metálicas ou cerâmicas. A matriz aglomera o reforço e proporciona ao compósito forma, aparência, tolerância ao ambiente e durabilidade, e em contrapartida, o reforço é responsável pelo suporte de cargas estruturais e pela dureza e resistência do compósito [13].

No que se refere aos tipos de polímeros sintéticos, podemos ter polímeros elastómeros, termoplásticos e termoendurecíveis, porém, de maneira a praticar um uso correto da impressora 3D, recorre-se ao uso de polímeros termoplásticos, já que a técnica a utilizar necessita de fundir o plástico para este ser impresso, ou seja, os compósitos termoplásticos são a escolha favorável, pois são o único tipo de polímeros capazes de serem reprocessáveis [14].

Considerando compósitos de matriz polimérica, vamos ter em conta o material termoplástico, policarbonato (PC), e o reforço, fibra de carbono.

#### **2.1.2.1. Policarbonato (PC)**

Policarbonato (PC) é um material termoplástico de excelente compatibilidade com uma elevada gama de materiais, cuja importância comercial tem vindo a aumentar ao longo dos anos [15]. Este é um material amorfo que se apresenta transparente com excepcional resistência ao impacto, boa dureza e boa estabilidade dimensional, num largo intervalo de temperaturas. Além disso, PC exibe boa ductilidade e é retardante de chama, contudo, é mau condutor elétrico, o que torna este termoplástico um excelente candidato para aplicações elétricas [16]. PC também apresenta boa resistência à radiação ultravioleta, podendo amarelar nesta reação, no entanto, esta degradação é maioritariamente superficial e pode ser facilmente evitada com a incorporação de aditivos [15].

Em suma, PC fornece uma boa relação entre resistência ao impacto, ductilidade, preço de produção e peso, tornando-o numa solução bastante atrativa para variadas aplicações de engenharia como o setor automóvel, aeronáutico, elétrico, medicina, etc.

#### **2.1.2.2. Fibra de carbono**

Fibras de carbono consistem em fibras em que, pelo menos, 92 % da massa da fibra corresponde ao elemento carbono (C). Estas fibras, geralmente, têm um diâmetro contido entre o intervalo de 5 a 10  $\mu\text{m}$  [17].

Ao longo dos anos, o interesse comercial nas fibras de carbono tem vindo a crescer, devido à necessidade de diferentes indústrias, como a aeronáutica, militar, construção, medicina, automóvel, desporto, entre outros, devido à sua elevada de rigidez-densidade [18]. Além disso, estas fibras dispõem de alta resistência à tração, excelente estabilidade térmica e química, elevada condutividade térmica e baixo coeficiente de expansão térmica, porém, as fibras de carbono apresentam anisotropia, logo deve-se ter em consideração em que tipo de solicitações este material irá estar exposto. Como se pode ver na figura 2.2, a fibra de carbono tem razão superior de rigidez-densidade de, pelo menos, 9 vezes em relação às ligas de aço e de alumínio, o que comprova a sua elevada utilidade em aplicações sujeitas a carga [17].

Material	Specific strength (Pa·m <sup>3</sup> /g)
Nylon	69
Oak	87
Polypropylene	89
Aluminum alloy	222
Steel alloy	254
Balsa axial load	521
Carbon fiber epoxy-matrix composite	785
Spider silk	1069
Glass fiber	1307
Carbon fiber	2457
Polyaramid (Kevlar®) fiber	2514
Polyethylene (Spectra®) fiber	3619

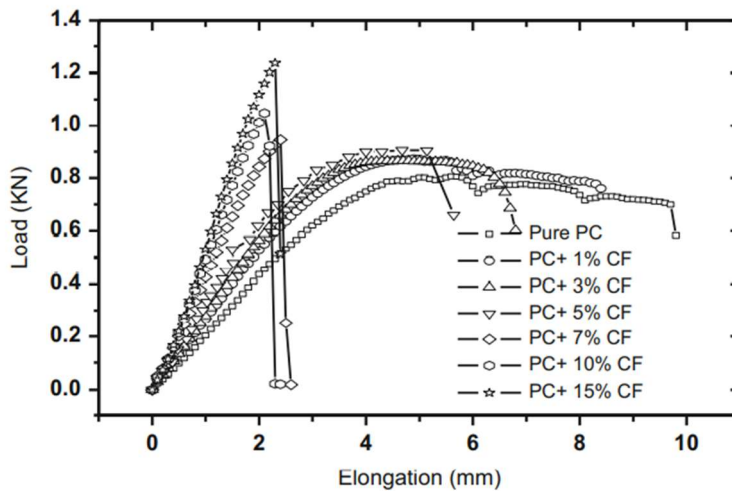
Spectra fiber is made from ultra-high-molecular-weight polyethylene. Polyaramid fibers are made from a polymer, namely poly(*p*-phenylenediamine terephthalate).

**Figura 2.2.** Comparação da força específica de vários materiais (adaptado de [17]).

Este aspeto leva a que a fibra de carbono seja um dos materiais mais relevantes no setor aeronáutico, substituindo inclusivamente os materiais metálicos mais convencionais, sem perder a rigidez necessária e concedendo liberdade de desenho de geometrias complexas aos encarregados do projeto, contudo, o seu desempenho depende amplamente da qualidade da ligação da interface [17], [19].

O uso de fibras de carbono como reforço de compósitos permite personalizar as propriedades do material em função da percentagem de fibras de carbono introduzida no compósito. Analisando a figura 2.3, verifica-se que o aumento de concentração de fibras de carbono de 0 para 15 % numa matriz de PC, resultou num aumento de rigidez em, aproximadamente, 177 % simultaneamente com a redução da sua deformação. Contudo, as propriedades mecânicas destes compósitos são fortemente dependentes da ligação interfacial, já que é esta que transfere a carga da matriz para o reforço.

Constata-se, assim, uma transição de um material dúctil para um material mais resistente e frágil, com o aumento da concentração de fibras de carbono. A presença das fibras de carbono dificulta o movimento das cadeias de monómeros de policarbonato, sendo necessário uma maior quantidade de energia, ou seja, carga, para deformar o compósito de policarbonato com reforço de fibras de carbono (PCCF) [19].

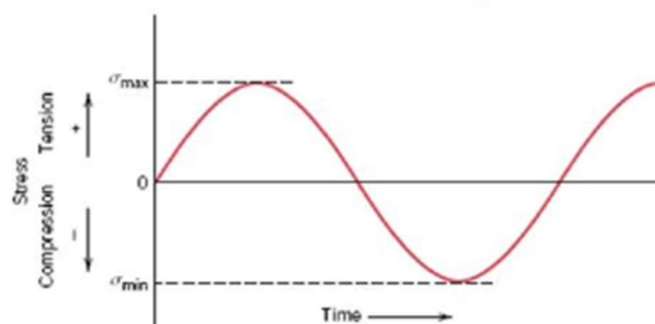


**Figura 2.3.** Curva tensão-deformação com a variação de concentração das fibras de carbono (adaptado de [19]).

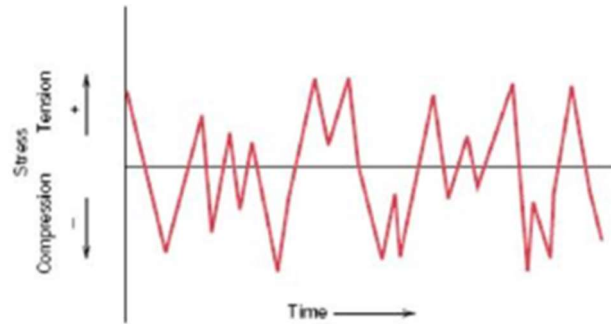
## 2.2. Fadiga

Fadiga é reconhecida, na engenharia, por ser um dos principais modos de falha de materiais ou máquinas de serviço. Este fenómeno ocorre quando um material ou componente está sujeito a cargas que variam com o tempo, que podem ser de uma tensão de valor inferior à tensão de rutura estimada estaticamente. Esta rutura acontece, devido à formação e propagação de fendas [20]. A estrutura está sujeita a cargas variáveis com o tempo que, com a contínua repetição de ciclos cria nucleação de fissuras a nível microscópico e a degradação progressiva no material, o que irá resultar na propagação de fenda macroscopicamente até que se torna instável e o material não consiga sustentar a carga, resultando numa rutura abrupta [21].

Como exemplificado nas figuras 2.4 e 2.5, a fadiga pode ocorrer a ciclos de variação de carga constante ou aleatória.

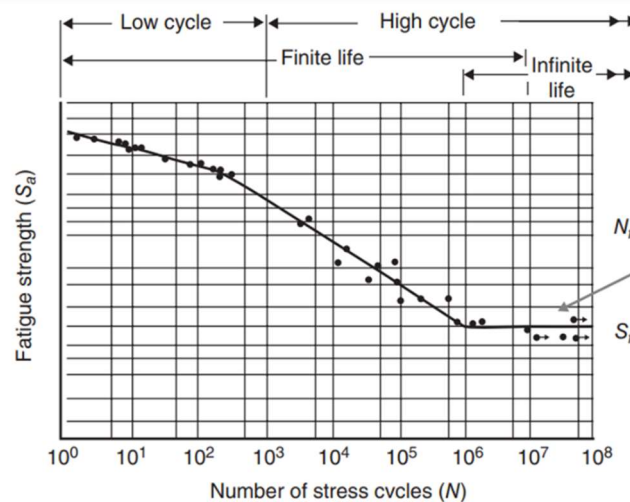


**Figura 2.4.** Ciclo de tensão constante (adaptado de [22]).



**Figura 2.5.** Ciclo de tensão aleatória (adaptado de [22]).

A metodologia mais utilizada para estudar o comportamento de materiais à fadiga é o recurso à curva de Wöhler, ou seja, curva S-N, onde é realizado um determinado número de testes à fadiga para diferentes cargas inferiores à tensão de rutura e registado o respetivo número de ciclos até à falha. A representação destas coordenadas num gráfico bi-logarítmico, de tensão versus número de ciclos à rutura, gera a curva S-N [23], ilustrada na figura 2.6.



**Figura 2.6.** Típica curva S-N (adaptado de [23]).

Neste estudo irá ser analisado a vida finita à fadiga. Para esta finalidade, irá se utilizar a curva S-N:

$$\sigma = bN_r^c \quad (2.1)$$

Com  $\sigma$ , a representar a tensão máxima do ensaio,  $N_r$ , o número de ciclos à rutura e  $b$  e  $c$  constantes do material em causa.

Assim, a amplitude de tensão,  $\sigma_a$ , será dada por:

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

---

E a razão de tensões  $R=0.1$ :

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{máx}} \quad (2.1)$$

Estas equações resumizam as variáveis necessárias à realização de testes à fadiga [24], [25]. Por outro lado, para se melhor perceber o comportamento de um material à fadiga será necessário ter-se em consideração os fatores que influenciam a criação de fendas, nomeadamente, a qualidade da superfície do material e a influência do ambiente em que o material irá ser utilizado. Estes fatores são as principais razões do início de nucleações de fenda, assim como a propagação desta. Por exemplo, um ensaio à fadiga de um polímero maquinado a frio num ambiente corrosivo irá, muito provavelmente, ter uma vida útil inferior a um polímero tratado termicamente num ambiente inofensivo. Assim sendo, ao polir as superfícies, efetuar tratamento térmico e controlar o ambiente de ensaio dos componentes, pode-se diminuir a taxa de crescimento de fenda e assim prolongar a vida do componente [26]. Por outra perspetiva, também é necessário ter o conhecimento sobre as variáveis possíveis que possam influenciar a taxa de propagação da fenda. No caso da temperatura, por exemplo, o seu aumento desta torna o material mais plástico e facilita a movimentação intramolecular, e a rigidez, visto que, na maioria dos modelos conhecidos, na fadiga, a taxa de propagação de fenda é inversamente proporcional à rigidez. No entanto, este fato não implica que, com o crescimento da fenda, a rigidez diminui. O aumento da fenda simplesmente resulta na diminuição de área efetiva que está a sustentar a carga [27], [28]. A rigidez mantém-se, mas a tensão que o material consegue suportar diminui, respeitando a seguinte equação:

$$\sigma = \frac{F}{A_s} \quad (2.4)$$

### 2.2.1. Fadiga em compósitos poliméricos fabricados por FDM

A análise de fadiga de compósitos é, de modo geral, exigente, uma vez que, as propriedades dos materiais da matriz e do reforço podem divergir, sendo assim, por vezes, difícil de prever o seu comportamento. Estes materiais sofrem variados mecanismos de falha, entre eles, fendas na matriz, separação fibra/matriz, fratura da fibra, delaminação, crescimento da porosidade, etc. Normalmente, a falha do material passa por três fases. Início

de criação de múltiplas fendas nos primeiros ciclos, onde microfendas iniciam por toda a matriz, podendo existir a separação entre fibras/matriz onde a ligação não seja tão boa. Seguidamente, sucede um crescimento de propagação de fendas constante, até que, por fim, as cargas exigidas ao material são demasiado grandes para o dano sofrido e ocorre rutura abrupta [29].

Visto que a matriz nos compósitos, geralmente é o material que apresenta maior volume, deve-se estudar o comportamento do mesmo. No caso de fadiga em materiais poliméricos pode ocorrer de duas maneiras distintas. Pode ser por falha térmica, através de amaciamento do material, devido ao autoaquecimento, que resulta na diminuição do módulo de tensão, ou por falha mecânica, que consiste na rutura do material a partir da criação e propagação de fendas [30].

A fadiga por falha térmica em materiais poliméricos é a que apresenta maior probabilidade de ocorrer, visto que este tipo de materiais são reconhecidos por serem maus condutores de calor, e, considerando o estudo de materiais termoplásticos, caracterizam-se pelos seus baixos valores de temperatura de transição vítrea baixa, comparativamente à de materiais poliméricos como os termofixos. Assim, estes componentes produzidos por estes tipos de materiais podem apresentar falha térmica a partir de calor quer absorvido externamente quer internamente por autoaquecimento. Quando materiais termoplásticos estão sujeitos a elevadas tensões e/ou frequências de ciclo de carga, este tipo de material tende a dissipar esta energia por forma de calor. Visto que é um material mau condutor térmico, o calor tende a ficar no material e aumentar a sua temperatura interna local, causando, desta forma, amolecimento do material, ou seja, é necessário menos energia para romper as ligações do material, diminuindo, assim, a tensão necessária para causar dano plástico no material [31]. Por exemplo, o estudo à fadiga envolvendo materiais termoplásticos reforçados com fibras de vidro realizado por Mortazavian e Fatemi (2015) evidenciou um aumento da temperatura de 10°C e 100°C para frequências de carga de 2 Hz e 10 Hz, respetivamente. Desta forma, o ensaio à frequência de 10 Hz teve como consequência uma queda acentuada da tensão máxima devido à transição de um estado vítreo para um mais plástico. Este estudo também concluiu que com o aumento inicial da frequência conduziu a um aumento da vida fadiga, já que o material se encontra mais dependente das fibras para suportar as variações de cargas. Porém, numa segunda fase, a uma frequência de maior valor, o material não tem a capacidade suficiente para dissipar o calor gerado, amolecendo a matriz polimérica e degradando as ligações entre a matriz e o

reforço, o que faz com o suporte de carga passa a ser mais dependente da matriz polimérica o que resulta na diminuição da vida à fadiga [32].

Por outro lado, a fadiga pode ser de característica mecânica e afetada pelos parâmetros utilizados na impressão do componente como o ângulo de impressão, a espessura da camada, a densidade de impressão, a temperatura de extrusão do filamento e velocidade de impressão. Inúmeros estudos já comprovaram que a densidade de impressão deve ser 100 % e a orientação 0° de maneira a obter maior resistência e rigidez, contudo, isto causa anisotropia no material, logo deve-se ter uma especial atenção ao tipo de carga. A temperatura de extrusão e velocidade de impressão afetam, principalmente, a formação de porosidades, tensões superficiais e o tempo de arrefecimento do material e, deste modo, o grau de cristalização do material. Outro cuidado especial a ter no fabrico aditivo é a qualidade de impressão, mais precisamente, a aderência entre filamentos e a qualidade de superfície de impressão da peça, já que a aderência entre filamentos permite a homogeneização da distribuição de cargas pela peça e que os defeitos superficiais são das principais causas de formação de fendas [4], [33], [34].

Para além de ser reconhecido que a presença de fibras de carbono num material melhora o seu desempenho mecânico, a literatura também refere que o seu aumento percentual em volume conduz a maiores valores de resistência à tração e rigidez, bem como a uma menor ductilidade devido ao menor movimento intermolecular. Contudo, quando os valores de reforço excedem os 60 % a 70 % de volume, o desempenho mecânico do material diminui porque passa a existir pouco material da matriz para aderir às fibras gerando, assim, uma má distribuição de carga pelo material [32], [35].

Desta forma, pode-se concluir que o reforço de uma matriz polimérica com fibras de carbono, promove maior resistência à tração, rigidez, estabilidade dimensional, superior condutividade térmica e maior vida à fadiga. Assim, a condutividade térmica dissipa o calor, diminuindo a possibilidade de falha por fadiga térmica e a maior rigidez decresce a taxa de propagação de fendas, derivando, desta forma, um limite de vida à fadiga superior.

### **2.2.2. Efeito da frequência**

A frequência é definida como o número de ciclos realizados de um evento, num espaço de tempo. Nesta dissertação, a frequência irá estar associada aos ensaios de fadiga, ou seja, a frequência será o número de ciclos de carga concluídos durante um segundo.



O efeito térmico é altamente influente no efeito da frequência na vida à fadiga. No caso de materiais de matriz termoplástica, estes exibem um comportamento mais viscoelástico, assim, pode-se dizer que este tipo de materiais exibe um comportamento mais dependente da frequência do que os materiais metálicos [36].

No estudo de polímeros termoplásticos, neste caso PEEK, concluiu-se que o aumento da frequência nos ensaios à fadiga tem como resultado o decréscimo da sua vida. Ensaios de frequências superiores a 5 Hz a 10 Hz, demonstrou-se ser comum um aumento de temperatura até 100°C. A literatura explica este aumento através da fricção entre zonas de fenda ou danificadas e pela acumulação local de calor, é devido à má condutividade térmica do material. Logo, gera-se um autoaquecimento que danifica as propriedades do material, amacia a matriz polimérica e deteriora a ligação interfacial e, assim, distribui desproporcionalmente as tensões suportadas diminuindo, conseqüentemente, a rigidez e assim, a vida à fadiga [37], [38].

Por outro lado, a literatura expressa que o aumento da frequência de carga, considerando um aumento insignificante da temperatura, diminui a velocidade de propagação da fenda que, por conseqüência, aumenta a vida à fadiga do material [35], [39]. Isto foi comprovado, de igual modo, pelo modelo proposto por Xiao (1999), segundo o qual, para o mesmo número de ciclos, a frequência mais baixa causa dano superior relativamente a frequências superiores [37]. Neste contexto, se considerarmos um ensaio de baixa frequência, este vai estar mais tempo sujeito à carga máxima do ensaio comparativamente aos ensaios de alta frequência, para o mesmo número de ciclos. Desta forma, a escolha do tipo de material deve ser feita de forma cuidada, de modo a respeitar o calor que o material é capaz de dissipar à frequência que o material irá estar exposto em situações reais.

### **2.2.3. Efeito do recozimento**

Recozimento é uma técnica de pós-produção, em que se reaquece o componente até uma temperatura superior à de transição vítrea do material, sem que ultrapasse a temperatura de fusão, com vista a obter, posteriormente ao arrefecimento, melhores propriedades mecânicas. Este processo geralmente é seguido por um lento arrefecimento para não criar tensões térmicas [40], [41]. Este reaquecimento visa facilitar a movimentação macromolecular e também, a ocorrência de uma reestruturação molecular e relaxamento viscoelástico do polímero. Para além da eliminação de porosidades e tensões criadas no processo de fabrico, promove o aumento da cristalinidade e, como resultado, maior

resistência do material. Contudo, este aumento de cristalinidade pode não ser homogêneo, visto que a área superficial arrefece com maior velocidade [42], [43].

Todavia, no caso dos compósitos também é reportado na literatura um menor desempenho mecânico devido à presença de bolhas de ar e baixa adesão entre as fibras com as camadas [41], [44]. Isto pode ser confirmado pelo estudo realizado por Bhandari S. et al (2019), onde se observa uma menor resistência à tração num compósito reforçado de fibra de carbono em relação ao polímero puro, ambos produzidos por fabrico aditivo. Assim, a partir do recozimento, demonstrou-se melhorar tanto a resistência à tração como o módulo de elasticidade, a partir do aumento de ligação interfacial entre a matriz e o reforço, e eliminando de grande porção das inclusões de ar [41], [45].

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo pretende-se descrever, de forma concisa e clara, os métodos e materiais que foram utilizados ao longo do procedimento experimental, que conduziu à presente dissertação.

#### 3.1. Materiais

No setor aeronáutico é muito importante a utilização e aplicação de materiais com características específicas e de elevado desempenho, nomeadamente, material leve, resistente e flexível, pois estas condições permitem que uma aeronave consiga voar e sustentar as diferenças de pressões. Uma maneira de alcançar esse fim será utilizando compósitos reforçados por fibras de carbono.

Assim, nesta dissertação, utilizaram-se dois materiais: policarbonato (PC) e policarbonato reforçado com fibra de carbono (PCCF). Para a sua caracterização mecânica foram realizados ensaios estáticos de tração e à fadiga, assim como foram avaliados os benefícios alcançados com um tratamento térmico designado de recozimento.

##### 3.1.1. Parâmetros de impressão

Os parâmetros de impressão usados no fabrico dos provetes estão ilustrados na Tabela 3.1 e resultam de estudos efetuados previamente com vista à sua otimização.

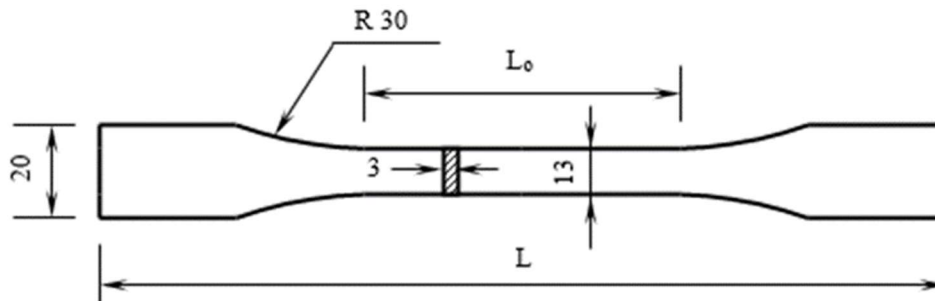
**Tabela 3.1.** Parâmetros de impressão dos provetes de PC e PCCF.

Parâmetros de impressão	PC	PCCF	Unidades
Temperatura da boca de impressão	265	275	°C
Velocidade de impressão	15	35	mm/s
Altura da camada	0.2	0.2	mm

##### 3.1.2. Provetes

Os provetes foram impressos, com as geometrias e dimensões ilustradas na Figura 3.2, por uma impressora 3D, *CreatBot F430*, pelo processo de modelação de deposição fundida. Estes seguiram as diretrizes recomendadas pelas normas ASTM D638-10, para os ensaios

da tração e, ASTM D7791-17, para os ensaios à fadiga. Para cada condição de ensaio foram usados três provetes.



**Figura 3.1.** Geometria e dimensão dos provetes usados neste estudo: L=160mm e L<sub>0</sub>=80 mm.

O propósito central dos ensaios é permitir comparar as propriedades mecânicas, nomeadamente, a vida à fadiga, a rigidez e a tensão máxima normal à tração e verificar os modos de falha do material, de maneira a concluir como as variáveis de recozimento e frequência cíclica de carga poderão afetar o desempenho do material numa situação a simular o espaço aeronáutico.

A variação da frequência serve para simular diferentes situações na utilização do material, visto que o mesmo não estará exposto a um só único tipo de ambiente, uniforme e constante ao longo do tempo, mas, sim, a carga cíclicas diferentes, devido às diferenças de pressão e vibrações que o componente fabricado estará sujeito. Assim, tanto PC como PCCF, foram analisados às frequências de 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz e 20 Hz.

O recozimento é o ato de reaquecer um material até uma temperatura próxima da transição vítrea, durante um período de tempo predefinido, arrefecendo, posteriormente, vagorosamente para que não se criem novas tensões térmicas. Assim, para este propósito, colocaram-se em recozimento quatro grupos de provetes, tanto para PC como PCCF, submetidos a uma dada temperatura durante intervalos de tempo distintos. Apesar de PC dispor de uma temperatura de transição vítrea de 147°C e PCCF 143°C, o forno foi aquecido para ambos os materiais até aos 165°C e, posteriormente, os provetes foram expostos ao calor durante 2 horas, 4 horas, 8 horas e 16 horas. Posteriormente, os provetes foram arrefecidos até à temperatura ambiente, abrindo progressivamente a porta do forno. Deste modo, através da aplicação deste método, prevê-se, por um lado, obter uma maior resistência à tração e rigidez, bem como melhorar a adesão entre a matriz e as fibras de reforço e, por

outro lado, eliminar eventuais bolhas de ar e algumas tensões térmicas criadas durante p fabrico do provete.

### 3.1.3. Especificação dos materiais

O material usado na experiência foi fornecido pela empresa 3DXTECH. Em primeiro lugar, utilizou-se o material de engenharia policarbonato (PC) e, em seguida, policarbonato com reforço de fibras de carbono (PCCF). As propriedades do PC e PCCF encontram-se, respetivamente, ilustradas nas tabelas 3.2 e 3.3.

**Tabela 3.2.** Propriedades do material PC fornecido pela empresa 3DXTECH (adaptado de [46]).

<b>Propriedades físicas</b>	<b>Norma</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor típico</b>
Densidade	ISO 1183	g/cm <sup>3</sup>	1.2
<b>Propriedades mecânicas</b>	<b>Norma</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor típico</b>
Resistência à tração	ISO 527	MPa	62
Módulo de elasticidade	ISO 527	MPa	2410
Deformação máxima à tração	ISO 527	%	7
Resistência à flexão	ISO 178	MPa	2200

**Tabela 3.3.** Propriedades do material PCCF fornecido pela empresa 3DXTECH (adaptado de [47]).

<b>Propriedades físicas</b>	<b>Norma</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor típico</b>
Densidade	ISO 1183	g/cm <sup>3</sup>	1.36
<b>Propriedades mecânicas</b>	<b>Norma</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor típico</b>
Resistência à tração	ISO 527	MPa	70
Módulo de elasticidade	ISO 527	MPa	6200
Deformação máxima à tração	ISO 527	%	2
Resistência à flexão	ISO 178	MPa	5890

## 3.2. Ensaios

Tendo em vista o estudo em causa e definidos os materiais a utilizar nos ensaios, terá de se ter em consideração os preparativos, procedimentos e medidas, que terão de ser realizadas antes de iniciar os ensaios.

Os ensaios foram todos realizados nas condições de temperatura e pressão ambiente.

### 3.2.1. Ensaio de tração

Geralmente, pressupõe-se que um componente não irá estar exposto à sua força máxima. Porém, para que se possa utilizar e produzir uma peça ou componente de acordo com os domínios de segurança, é importante o conhecer o seu desempenho mecânico. Neste sentido, a fim de conhecer a tensão máxima que um componente realizado com os materiais referidos neste estudo consegue sustentar, os provetes de PC policarbonato e PCCF policarbonato com reforço de fibras de carbono foram submetidos a ensaios à tração. Este tipo de ensaios tem como objetivo avaliar a força máxima a que o material consegue ser exposto, sem que este fracture. O provete é seguro longitudinalmente por ambos os lados da máquina, neste caso SHIMADZU AGS-X, que se ilustra na figura 3.2, e submetido a uma força axial progressiva. Esta força deforma gradualmente o provete e, a partir de um extensómetro, é medida a sua deformação.



**Figura 3.2.** Máquina de ensaio à tração SHIMADZU AGS – X.

Assim, dividindo a força máxima obtida pelo ensaio pela área do provete medida previamente consegue-se obter, a partir dos valores fornecidos pela curva de tensão-deformação, e segundo a equação 3.1, a tensão máxima média:

$$\sigma = \frac{F}{A_s} \quad (3.1)$$

Por outro lado, com base na variação da tensão, medida pela máquina SHIMAZDU AGS-X, e variação da deformação medida pelo extensómetro, é possível obter a rigidez do material de acordo com a equação 3.2:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (3.2)$$

Esta tensão calculada irá ser útil para a realização dos ensaios realizados à fadiga.

### 3.2.2. Ensaio de fadiga

A fadiga de elementos usados no setor automóvel ou aeronáutico deve ser bem conhecida para que possa ser considerada em fase de projeto. Na generalidade, os componentes no seu desempenho em serviço estão expostos a cargas cíclicas, logo, é conveniente por questões de segurança e durabilidade do produto, conhecer a vida à fadiga de uma peça e, conseqüentemente, os fatores que a influenciam.

No presente caso, a tensão máxima média obtida nos ensaios de tração foi utilizada para garantir que os valores de tensão usados são inferiores e utilizou-se uma razão de tensões igual a 0,1, para garantir uma resposta à tração e, deste modo, as respetivas vidas à fadiga foram analisadas através de curvas S-N.



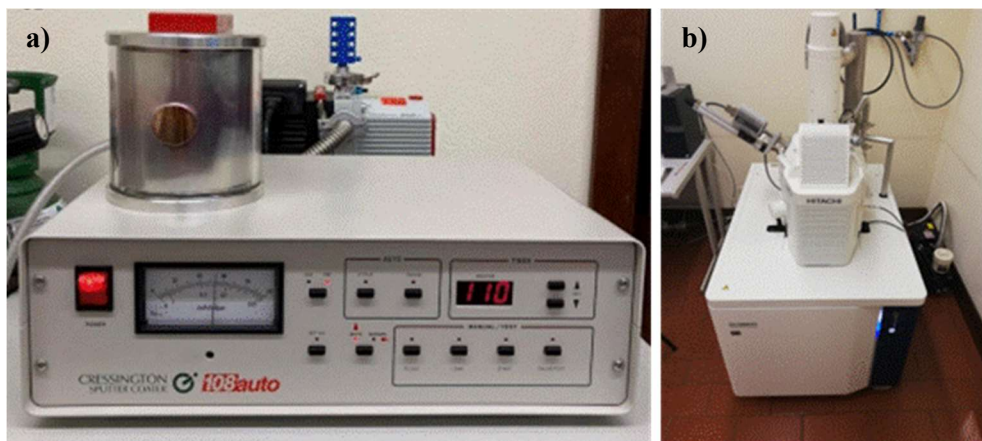
**Figura 3.3.** Máquina servo-hidráulica Dartec usada nos ensaios de fadiga.

Do mesmo modo estudou-se o efeito da frequência e as diferentes condições de recozimento, para além da variação dinâmica da rigidez, que serão comparadas no próximo capítulo.

### 3.2.3. Scanning Electron Microscope (SEM)

Para examinar as superfícies de fratura nos provetes tanto nos ensaios realizados à tração como à fadiga, é necessária uma imagem mais pormenorizada, de maneira a perceber quais os diferentes mecanismos de fratura existentes. Para este propósito, efetuou-se uma análise com recurso a um *scanning electron microscope*.

Para tal, as amostras são colocadas numa plataforma previamente desinfetada e, seguidamente, inseridas dentro de uma câmara onde serão revestidas por uma camada de ouro. A câmara é colocada em vácuo e exposta a um gás inerte, árgon. Esta dispõe de eletrões livres que desequilibram o estado dos átomos de árgon. O material alvo, ouro, é carregado negativamente, atraindo, assim, os iões positivos de árgon. Desta forma, os iões de árgon colidem com o material alvo expelindo o ouro para cima das amostras e criando mais eletrões livres. Este processo repete-se até se obter a espessura requerida do substrato nas amostras.



**Figura 3.4.** a) Equipamento de revestimento *Cressington 108 Sputter Coater*; b) Microscópio *Hitachi SU3800*.

Este processo ocorre devido ao microscópio, *Hitachi SU3800*, necessitar de uma camada metálica para conseguir observar a amostra. As amostras são colocadas novamente em vácuo e procede-se à análise microscópica.

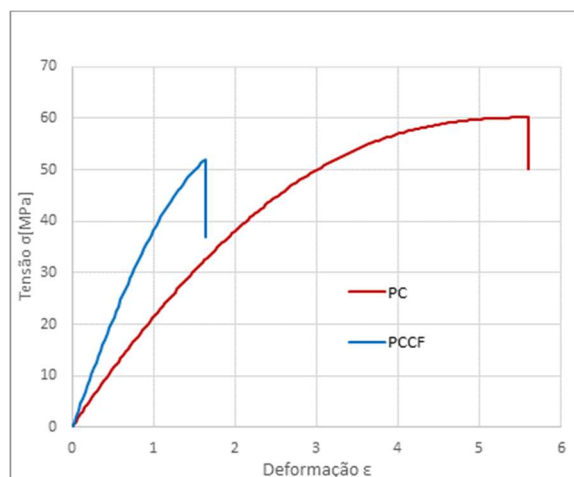


## 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo, pretende-se analisar e interpretar os resultados obtidos nos ensaios realizados que foram descritos no capítulo anterior.

### 4.1. Análise à tração

Os ensaios de tração foram realizados com provetes envolvendo os diferentes materiais (PC e PCCF), por forma a avaliar a sua resistência à tração e respetiva rigidez. As mesmas propriedades mecânicas foram avaliadas para os diferentes recozimentos realizados (2 horas, 4 horas, 8 horas e 16 horas) e devidamente comparadas com as obtidas nos provetes de controlo (sem recozimento). Assim, no que se refere ao PC e PCCF, a Figura 4.1 ilustra as curvas tensão-deformação obtidas para os materiais conforme produzidos.

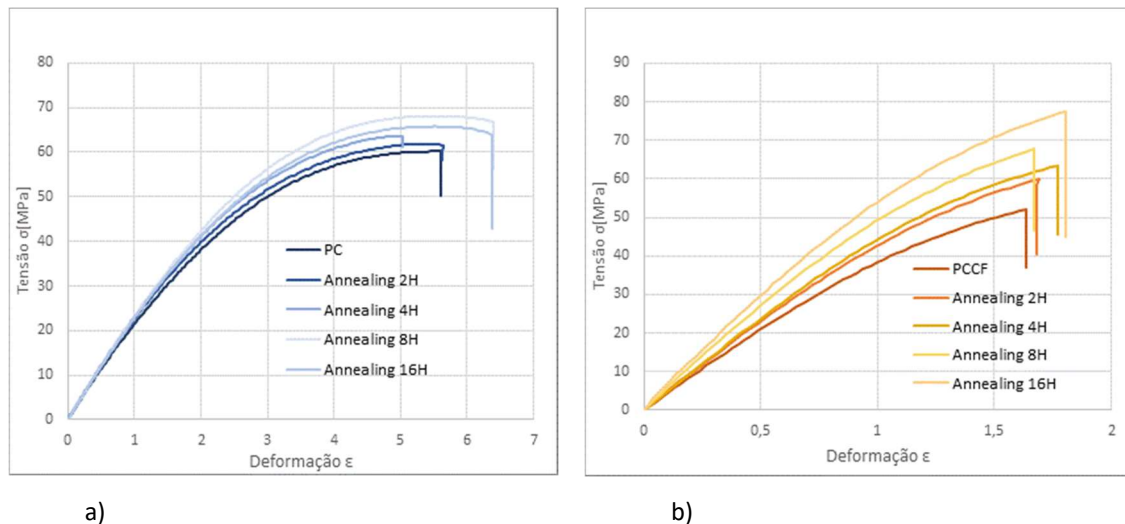


**Figura 4.1.** Curva tensão-deformação de controlo de PC e PCCF, à frequência de 5 Hz.

Pode-se verificar que a adição de fibras de carbono resulta numa redução da resistência à tração em cerca de 14,7% face ao valor obtido no polímero (PC sem fibras de carbono). Seria, de acordo com a literatura, expectável maior resistência estática, mas o baixo valor obtido pode-se explicar devido a uma possível presença de bolhas de ar e baixa adesão entre as fibras e a matriz [44]. Por outro lado, a diminuição da ductilidade do PCCF comprova o que é referido na literatura. Devido à adição das fibras de carbono, o movimento macromolecular da matriz é restringido. Relativamente à rigidez do PCCF também se encontra coerente com esperado, aumentando em cerca de 83 % relativamente ao PC. Este aumento é devido à introdução das fibras.

#### 4.1.1. Recozimento

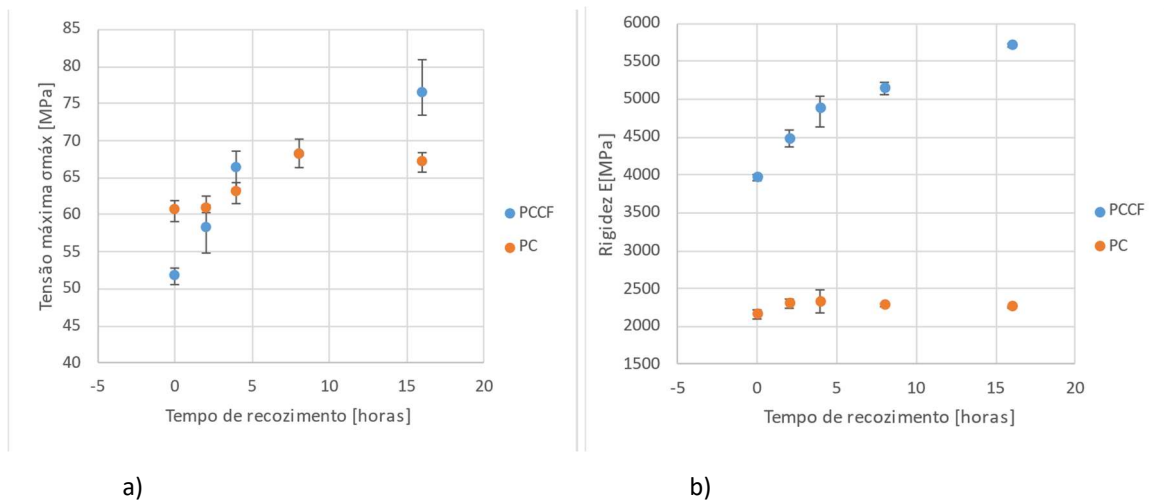
A figura 4.2 ilustra as curvas tensão-deformação para os diferentes materiais e condições de recozimento.



**Figura 4.2.** Curvas tensão-deformação para as diferentes condições de recozimento: a) Para o PC; b) Para o PCCF.

Estas curvas evidenciam o efeito da introdução das fibras de carbono e dos diferentes tratamentos. O efeito do recozimento revela-se mais benéfico para PCCF do que para PC, porém, apesar do reforço de carbono aplicado, pode-se verificar que, inicialmente, a tensão de rutura de PC é superior a PCCF. O tratamento de recozimento permite facilitar o movimento macromolecular e, assim, a ocorrência de reestruturação do material. Desta forma, permitirá aumentar a aderência entre a matriz e a fibra e a eliminação de poros criados durante o fabrico dos provetes. Por outro lado, a elevada condutividade proporcionada pelas fibras de carbono facilita a orientação do calor das zonas superficiais para o interior, permitindo, assim, um recozimento mais homogêneo. O conjunto destes fatores evidencia a razão do efeito do recozimento na tensão de rutura de PCCF ser claramente superior a PC, como se pode verificar nas figuras 4.3.

É possível constatar que o efeito do recozimento na rigidez do PC é pouco acentuado, enquanto no PCCF os benefícios do recozimento conduzem a uma evolução da rigidez semelhante à da tensão de rutura. Neste caso, por exemplo, as 16 horas de exposição à temperatura de 165 °C promove um aumento da tensão de rutura em cerca de 47,7 %, enquanto no PC este aumento é apenas na ordem dos 10,6 %.



**Figura 4.3.** PC e PCCF a diferentes condições de recozimento: a) Evolução da resistência mecânica; b) Rigidez à tração.

**Tabela 4.1.** Comparação do aumento dos valores em percentagem, de PC e PCCF, da tensão máxima e rigidez submetidos a recozimento, aos valores de controlo.

Tempo de recozimento	Tensão [MPa]		Rigidez [MPa]	
	PC [%]	PCCF [%]	PC [%]	PCCF [%]
2 h	0,3	12,8	5,8	12,8
4 h	4,1	28,8	7,5	22,8
8 h	12,3	31,9	5,5	29,8
16 h	10,6	47,7	3,9	44,0

## 4.2. Análise à fadiga

A partir dos ensaios realizados à fadiga estabeleceram-se as curvas S-N, com vista a observar os benefícios alcançados com a introdução das fibras de carbono, o efeito da variação da frequência e do recozimento. Posteriormente, tendo em conta que a rigidez de um material é um dos fatores mais relevantes na análise à fadiga, e que a própria rigidez tem uma relação proporcionalmente inversa à taxa de propagação de fenda, analisou-se a vida à fadiga com vista a justificar os diferentes comportamentos ao longo da sua vida útil.

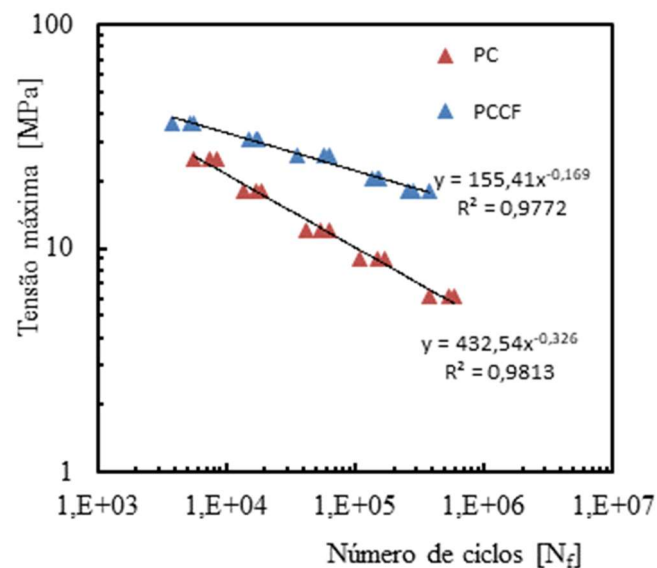
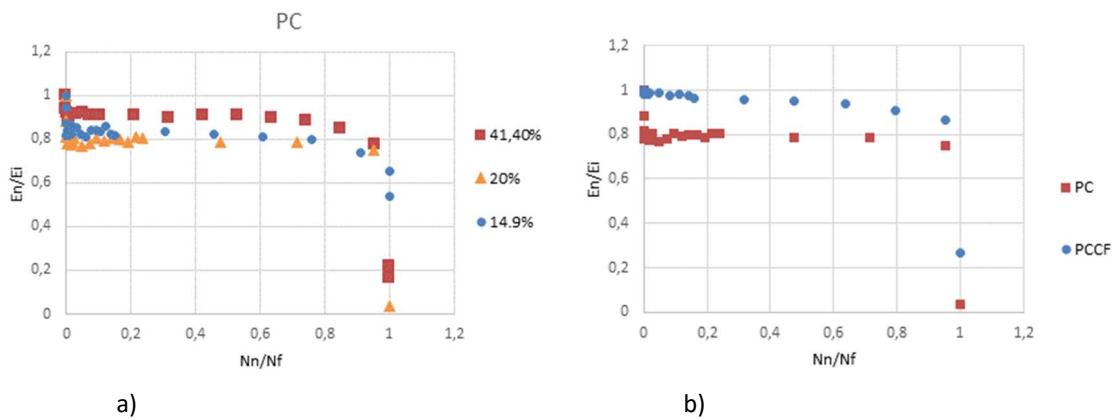


Figura 4.4. Curvas S-N de controle de PC e PCCF, à frequência de 5 Hz.

Na figura 4.4, podemos observar as curvas S-N de PC e PCCF estimadas a partir dos ensaios realizados à frequência de 5 Hz. Apesar dos ensaios à tração concluírem que PCCF tem uma resistência mecânica à tração inferior à do PC, no que concerne à fadiga verificam-se maiores vidas. Por exemplo, se for considerada uma vida à fadiga de 60 000 ciclos, enquanto ao PC está associada uma tensão cíclica de 12,1 MPa, para o PCCF este valor é de 25,9 MPa, correspondendo a um aumento na ordem das 2,14 vezes. No entanto para as vidas mais curtas os valores de tensão são muito semelhantes.

A variação da rigidez ao longo dos ensaios de fadiga encontra-se ilustrada na figura 4.5 para o PC e PCCF. Independentemente do valor da carga aplicada, a rigidez tem uma evolução muito semelhante, evidenciando a existência de três estágios. Assim, logo nos primeiros ciclos sugere-se a aparição de múltiplas micro-fissuras e descolamentos da matriz com as fibras, justificando a diminuição da rigidez observada. Posteriormente, o crescimento destas fissuras é quase linear com a vida de fadiga, ao que o colapso iminente surge devido à quantidade de dano introduzido pela carga cíclica.

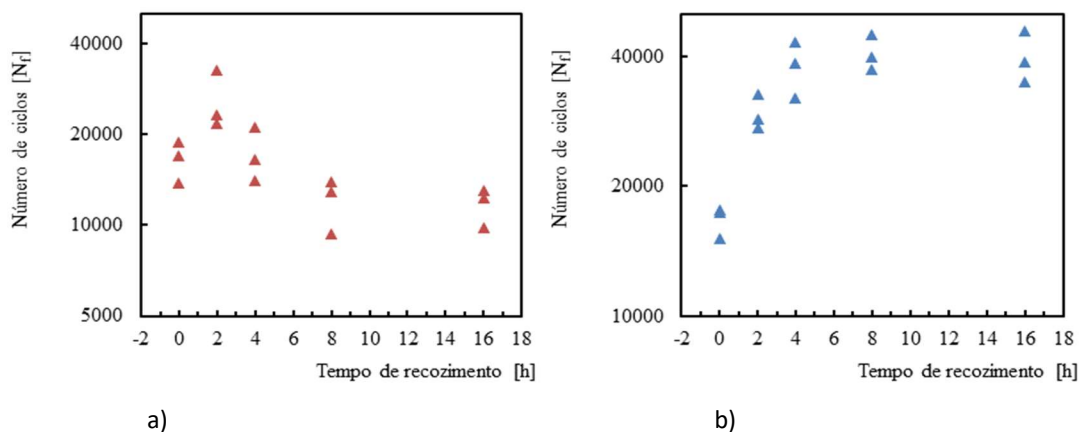


**Figura 4.5.** Variação da rigidez ao longo da vida de fadiga, à frequência de 5 Hz e 0 horas de recozimento, para: a) O Policarbonato sujeito a diferentes percentagens da carga máxima; b) O Policarbonato e Policarbonato reforçado com fibra de carbono sujeito a uma carga média de 20% e 50%, respetivamente.

Finalmente comparando os diferentes materiais, é possível observar que, na fase inicial, o PC apresenta um maior decréscimo de rigidez do que o PCCF. Esta diferença pode ser causada pela adição de fibras de carbono, as quais promovem um aumento de rigidez de cerca de 82 %. Este acréscimo de rigidez resulta numa diminuição do dano acumulado inicial, uma vez que, a adição de fibras dificulta a propagação de fendas pela matriz e diminui a ductilidade. Assim, esta diferença de rigidez pode justificar a diferença dos comportamentos à fadiga observados.

#### 4.2.1. Recozimento

A figura 4.6 mostra a vida à fadiga para os diferentes materiais e condições de recozimento. Estes materiais são ensaiados à frequência de 5 Hz, com uma carga de 18,1 MPa e 31,1 MPa para PC e PCCF, respetivamente.

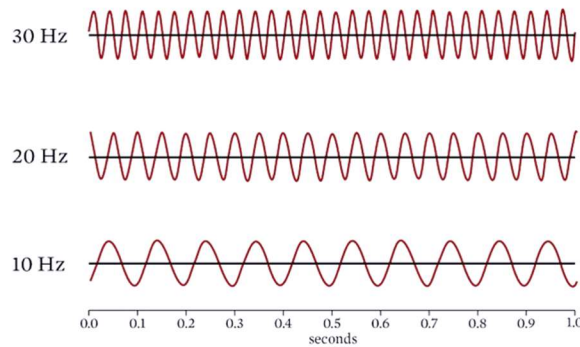


**Figura 4.6.** Vida à fadiga, à frequência de 5 Hz, submetida a vários tempos de recozimento de: a) PC; e b) PCCF.

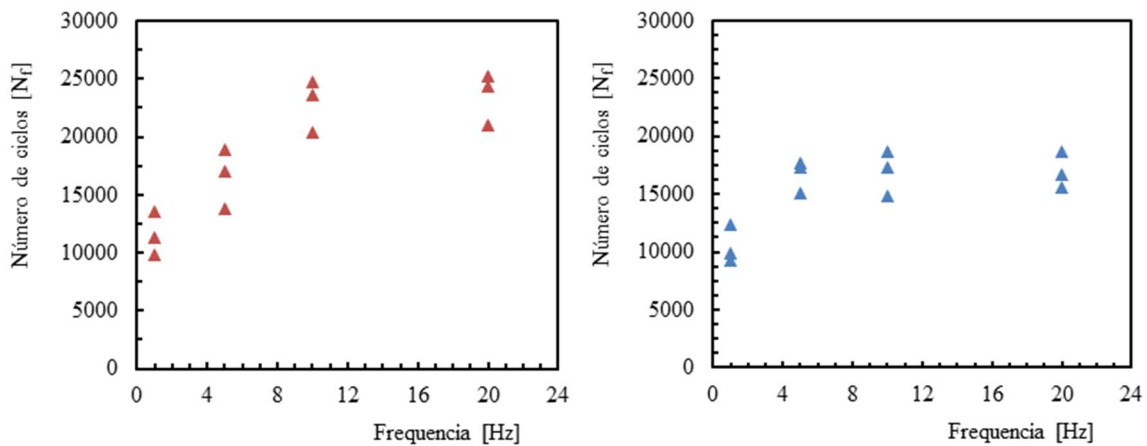
É possível observar que o tempo de recozimento mais eficaz é de 2 horas para o PC, o qual conduz a maiores vidas de fadiga, e que períodos de exposição superiores levam à diminuição da vida de fadiga. Geralmente, o recozimento resulta no aumento da cristalinidade e, conseqüentemente, numa maior organização da estrutura molecular, o que aumenta a resistência do material. Porém, o efeito de uma exposição prolongada para o PC aparenta, ainda que não tenha sido estudado detalhadamente, ter resultado numa possível diminuição da cristalinidade e/ou degradação do polímero. Assim, apenas com recurso a um estudo mais específico, este efeito poderá ser explicado com mais detalhe. No que diz respeito ao PCCF, figura 4.6b, a vida à fadiga apresenta um aumento abrupto com apenas 2 horas de recozimento. Relativamente aos provetes de controlo, a vida à fadiga aumenta em cerca de 76,6 %, estabilizando a partir das 4 horas onde se verifica um aumento da vida à fadiga na ordem dos 153,3 %. Este benefício pode ser justificado pelo provável aumento da adesão fibra/matriz e/ou diminuição das porosidades resultantes do processo de fabrico. Nestas situações ocorre o aumento da rigidez e, por consequência, a diminuição da taxa de propagação das fissuras que promovem a melhoria da vida à fadiga do compósito.

#### **4.2.2. Efeito da Frequência**

Com vista a estudar o efeito da frequência e do tratamento de recozimento, foram escolhidos os níveis de tensão de 18,1 MPa e 31,1 MPa para o PC e PCCF, respetivamente, dado que estes têm semelhante valores de fadiga para a frequência de 5 Hz. Em contexto de fadiga, a frequência é definida como o número de vezes que o provete está submetido a uma carga durante um segundo. Assim, se considerarmos um ensaio avaliado a uma frequência elevada e outro a uma frequência baixa, com o mesmo número de ciclos para os dois ensaios mencionados, a experiência de frequência menor vai estar submetida à carga máxima durante mais tempo para o mesmo número de ciclos (ver figura 4.7). Como resultado, os ensaios de frequência menores têm uma propagação de fenda superior e, deste modo, a vida à fadiga dos ensaios de baixa frequência é menor que os ensaios de elevada frequência, desde que os materiais envolvidos na experiência disponham de baixo autoaquecimento às frequências avaliadas. No que diz respeito ao efeito da frequência na vida à fadiga dos materiais em estudo, ele encontra-se ilustrado na figura 4.8.



**Figura 4.7.** Variação da carga para várias frequências (adaptado de [48]).



**Figura 4.8.** Efeito da frequência na vida à fadiga: a) Para o PC; b) Para o PCCF.

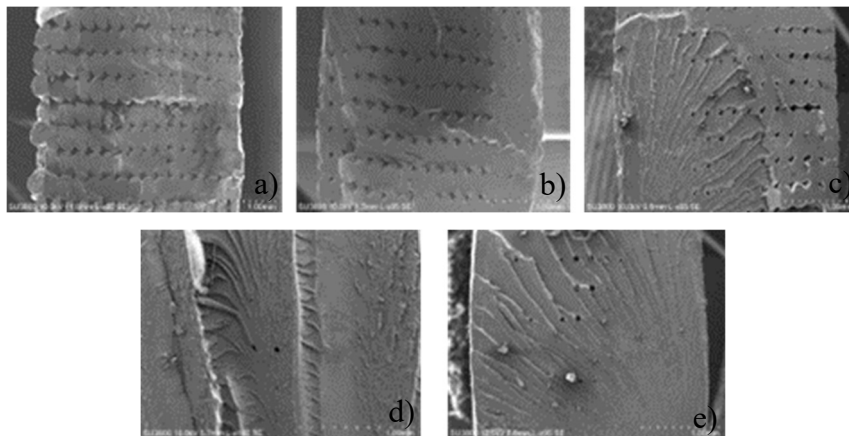
Para ambos os materiais, verifica-se que o aumento da frequência de 1 Hz até 5 Hz aumenta a vida à fadiga, ou seja, é possível dizer que o efeito é semelhante independentemente da introdução de fibras no polímero. No entanto, para valores superiores, enquanto no PC observa-se que a vida à fadiga continua a aumentar até à frequência de 10 Hz, mantendo-se posteriormente constante, no PCCF, ela estabiliza (mantem-se constante) para valores acima dos 5Hz. Assim sendo, é possível dizer que a vida à fadiga do PC estabiliza para um valor 33 % superior à vida de fadiga do PCCF.

Com base na literatura, a adição de fibras de carbono aumenta a rigidez do material e, como já foi referido, uma menor taxa de propagação e o consequente aumento da vida à fadiga. Apesar do PCCF tolerar um maior carregamento, seria previsível um aumento semelhante ao do PC. No entanto, embora o PC também apresente porosidade, o material apresenta melhor ligação entre si. Deste modo, apesar das fibras de carbono serem implementadas com objetivo de desempenharem funções estruturais, a provável presença de má adesão entre a matriz e o reforço faz com que o PC seja uma melhor opção quando o

objetivo seja maximizar a vida à fadiga a frequências de ciclo de carga superiores. O autoaquecimento aparenta ser desprezável para ambos os materiais, uma vez que o material de maior condução térmica, o PCCF, é o que apresenta pior desempenho à fadiga. No entanto, deve-se ter em consideração no uso em ensaios de frequência superior.

### 4.3. Análise SEM

Neste capítulo, podemos analisar as fraturas transversais dos provetes à fadiga, face ao tempo de recozimento.

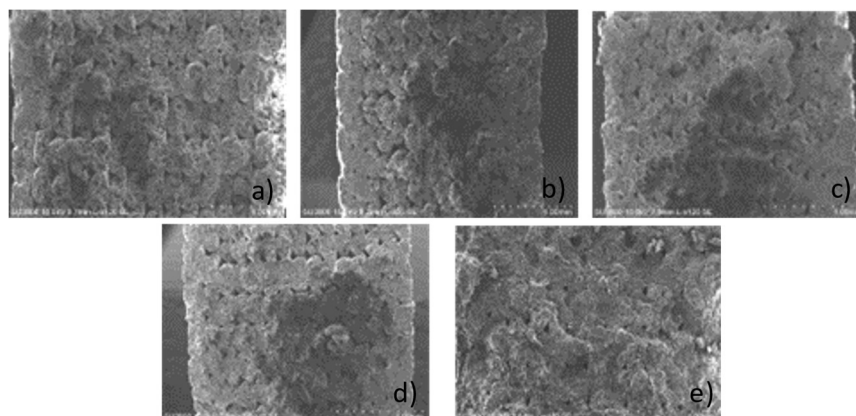


**Figura 4.9.** Análise SEM do efeito do recozimento nos provetes de PC a) controlo, escala 1:80; b) 2 horas, escala 1:95; c) 4 horas, escala 1:85; d) 8 horas, escala 1:140; e) 16 horas, escala 1:95.

Analisando as imagens da figura 4.9, verifica-se facilmente melhoria de ligações entre filamentos, eliminação de porosidades, assim como a transição do material para um aspeto mais dúctil. Atendendo ao ponto de vista estático dos materiais, pode-se observar que para a tensão de rutura e rigidez de PC os seus melhores valores são obtidos às 8 horas e 4 horas de recozimento, respetivamente. Desta forma, ao comparar com as análises SEM, pode-se concluir que, para o maior efeito do tratamento térmico na tensão de rutura, o aspeto crucial foi a melhoria de ligação e eliminação de porosidades, imagens c) e d) figura 4.9. Embora a rigidez seja menor a 8 horas de recozimento, o aumento da ductilidade compensa esse decréscimo. O valor da rigidez atinge o extremo para 4 horas de recozimento, que confrontando com as análises SEM, imagem c) da figura 4.9, verifica-se notável melhoria de ligações e eliminação de porosidades, contudo, o aspeto dúctil do material não é tão prevalente. Apesar da análise estática favorecer horas de recozimento superiores, a vida à fadiga é máxima para 2 horas de recozimento. Como se já referiu, a rigidez é uma das

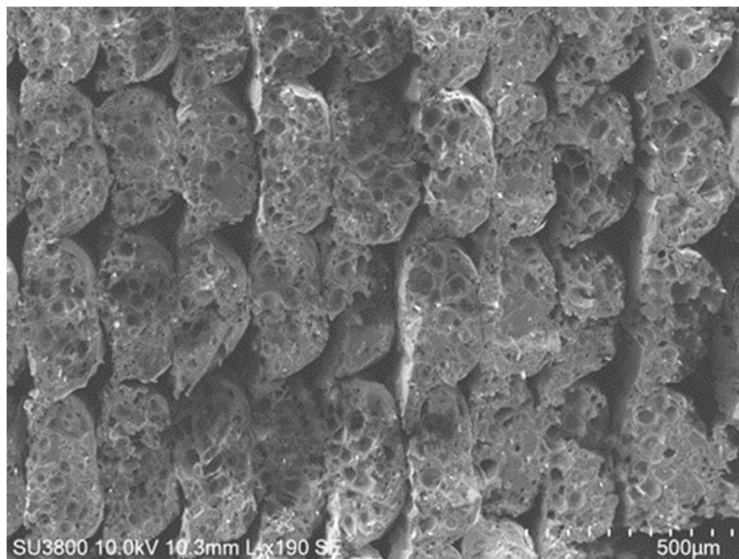


principais propriedades dos materiais que previne a propagação de fendas, e como se pode presenciar nas figuras 4.2a) e 4.3, o tempo de recozimento com maior ductilidade conciliado com maior rigidez é 2 horas, logo, é este que irá necessitar de maior número de ciclos para atingir a rutura.

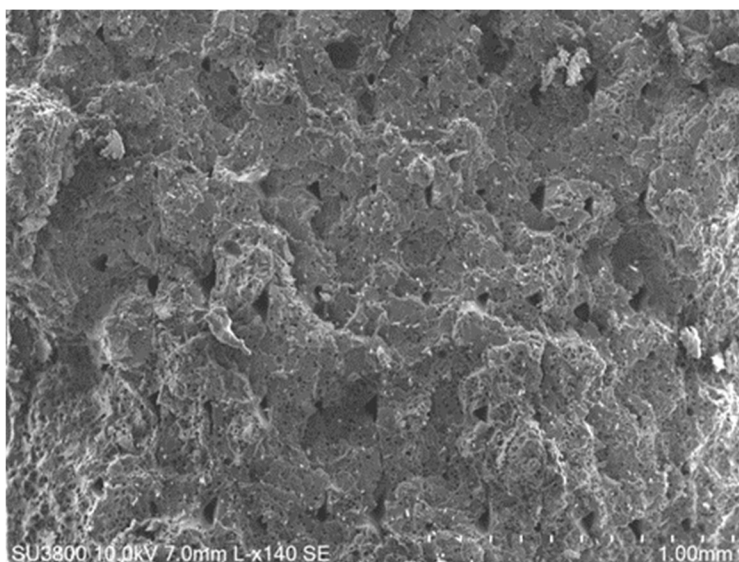


**Figura 4.10.** Análise SEM do efeito do recozimento nos provetes de PCCF a) controlo, escala 1:120; b) 2 horas, escala 1:95; c) 4 horas, escala 1:120; d) 8 horas, escala 1:110; e e) 16 horas, escala 1:140.

Conforme no material PC, da mesma forma, em PCCF, na figura 4.10, verifica-se a melhoria de ligações quer entre filamentos como entre matriz e reforço, diminuição do número de porosidades e transição do material para um estado de maior plasticidade. Estas evoluções no material são visíveis, também, nas figuras 4.11 e 4.12. Analisando os provetes sucessivamente a SEM é facilmente visível a transformação de um material constituído por filamentos para um material uniforme, sem diferenciamento de filamentos. Examinando o material PCCF, os tempos de recozimento para os valores máximos para a tensão de rutura, rigidez e vida à fadiga coincidem nas 16 horas de exposição ao tratamento térmico, figuras 4.3 e 4.6b). Estes valores concordam com o facto de se verificar, principalmente, uma evolução elevada da melhoria de ligações, pois é devido a estas serem fracas nos provetes de controlo que a adição de fibras de carbono não resultou numa melhoria da tensão de rutura, assim como vida à fadiga comparativamente a PC.



**Figura 4.11.** Análise SEM do efeito do recozimento no provete de PCCF de controle, escala 1:190.



**Figura 4.12.** Análise SEM do efeito do recozimento nos provetes de PCCF a 16 horas de recozimento, escala 1:140.

Em suma, o tratamento térmico realizado em ambos os materiais tende a converter o material para uma deformação mais dúctil, afetando mais notoriamente as propriedades do material PCCF. Verifica-se, também, que o prolongamento do tempo de recozimento é proporcional ao acréscimo de ligação entre filamentos e diminuição de porosidade. Além disso, em PCCF, este acontecimento também é plausível resultar numa melhoria da ligação entre a matriz e o reforço. Isto reflete-se maioritariamente nas propriedades de resistência à tração e rigidez. A conciliação dos valores máximos destas propriedades aparenta corresponder aos máximos valores de fadiga para cada material.

## 5. CONCLUSÃO

Nesta dissertação foi efetuado o estudo de fadiga com vista a perceber o efeito de introduzir um reforço de carbono num material termoplástico para produção de componentes aeronáuticos.

Inicialmente realizou-se uma análise estática com vista à caracterização dos diferentes materiais. A adição de fibras de carbono ao PC revela-se benéfica, resultando num aumento de rigidez na ordem dos 83 %, porém num decréscimo de 14,7 % da resistência à tração devido à fraca ligação quer entre filamentos, como entre a matriz e as fibras, originando como consequência a distribuição de carga irregular pelo material, fazendo com que umas fibras tenham de suportar mais carga que outras ou até mesmo a matriz seja encarregue pelo suporte dessas cargas. Por outro lado, o recozimento mostrou-se uma forma eficaz de melhorar o desempenho mecânico de ambos os materiais (resistência à tração e rigidez), mas este revelou-se mais eficaz ao nível do PCCF. Enquanto a tensão de rutura para o PC teve um aumento de 12,3 % até as 8 horas de recozimento e a rigidez em 7,5 % até às 4 horas de recozimento, no caso do PCCF estes valores foram de 47,7 % e a rigidez 44 %, ambas após as 16 horas de recozimento. Estas melhorias devem-se essencialmente à melhor adesão entre filamentos e, no caso do compósito, à melhor adesão fibra/matriz.

No que concerne à fadiga, a análise das curvas S-N revela que o PCCF apresenta maiores vidas à fadiga que o polímero, na região das vidas mais longas, embora para as vidas mais curtas a introdução de fibras não conduz a benefícios evidentes. Esta diferença provém de a rigidez ser proporcionalmente inversa à taxa de propagação de fendas, logo o aumento da rigidez contribui para o aumento de vida à fadiga.

O aumento da frequência, para ambos os materiais, promove uma maior vida à fadiga, embora estabilize entre os 10 Hz e 20 Hz. Porém, é mais eficaz para o PC com um aumento de 104,1 % comparativamente aos 61,8 % do PCCF. Para as frequências utilizadas parece não existir autoaquecimento, contudo, as temperaturas não foram medidas. Assim, esta é uma variável que se deve ter em atenção se for pretendido maiores valores para as frequências de ensaio.

O efeito do recozimento na fadiga traduz-se numa melhoria significativa quando a resistência mecânica é maximizada. No caso do PCCF, existe um acréscimo de 153,3 % no

número de ciclos à rotura para um tratamento de 16 horas, valor que estabiliza após as 4 horas de recozimento. No que diz respeito ao PC, ele atinge a maior vida à fadiga para as 2 horas de recozimento, com um aumento de 56,4 %, diminuindo, posteriormente, para tempos de exposição superiores. Esta resposta do material pode indicar degradação, enquanto no PCCF a maior condução térmica poderá conduzir a um recozimento mais homogêneo.

### **5.1. Sugestões para trabalhos futuros**

O contínuo estudo de outros materiais termoplásticos que tenham a possibilidade de demonstrar uma harmonia superior de modo a obter propriedades superiores para aplicações da área aeronáutica.

Medição da temperatura ao analisar a influência da frequência de forma a prever quando é que o efeito do autoaquecimento influencia a fadiga do material.

Efetuar o recozimento dos materiais, nomeadamente, o PCCF e, posteriormente, estudar o efeito da frequência, já que o desempenho observado não foi o previsível devido, possivelmente, às fracas ligações entre a matriz e a fibra.

Estudo da cristalinidade, temperatura e tempo de recozimento para os materiais estudados, já que a temperatura e tempo de recozimento ótimos não foram analisados e os resultados de recozimento de PC podem ter sido afetados por degradação do material.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Mercedes-Benz, «Benz Patent Motor Car». <https://www.mercedes-benz.com/en/art-and-culture/mercedes-benz-museum/benz-patent-motor-car-2/> (acedido 8 de Fevereiro de 2023).
- [2] Markforged, «Additive Manufacturing History: From the 1980's to Now». <https://markforged.com/resources/blog/additive-manufacturing-history> (acedido 10 de Janeiro de 2023).
- [3] E. Yasa e K. Ersoy, «Additive Manufacturing of Polymer Matrix Composites», em *Aircraft Technology*, InTech, 2018. doi: 10.5772/intechopen.75628.
- [4] V. Shanmugam *et al.*, «Fatigue behaviour of FDM-3D printed polymers, polymeric composites and architected cellular materials», *Int J Fatigue*, vol. 143, Fev. 2021, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2020.106007.
- [5] GE Additive, «Aviation and aerospace industry». <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/industries/aviation-aerospace> (acedido 15 de Dezembro de 2022).
- [6] A. N. Dickson, J. N. Barry, K. A. McDonnell, e D. P. Dowling, «Fabrication of continuous carbon, glass and Kevlar fibre reinforced polymer composites using additive manufacturing», *Addit Manuf*, vol. 16, pp. 146–152, Ago. 2017, doi: 10.1016/j.addma.2017.06.004.
- [7] «United States Patent (19) Crump (54) APPARATUS AND METHOD FOR CREATING THREE-DIMENSIONAL OBJECTS».
- [8] M. K. Mantrala, G. Suresh, K. L. Narayana, e M. K. Mallik, «A Review on Development of Medical Implants by Rapid Prototyping Technology Article in», *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, vol. 117, n. 21, pp. 257–276, 2017.
- [9] K. S. Boparai, R. Singh, e J. S. Chohan, «Environmental Impact Subtracting Versus Additive Manufacturing», em *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*, Elsevier, 2020, pp. 389–394. doi: 10.1016/b978-0-12-803581-8.11504-8.
- [10] M. Selva Priya, K. Naresh, R. Jayaganthan, e R. Velmurugan, «A comparative study between in-house 3D printed and injection molded ABS and PLA polymers for low-frequency applications», *Mater Res Express*, vol. 6, n. 8, Jun. 2019, doi: 10.1088/2053-1591/ab2776.
- [11] J. P. Reis, M. de Moura, e S. Samborski, «Thermoplastic composites and their promising applications in joining and repair composites structures: A review», *Materials*, vol. 13, n. 24. MDPI AG, pp. 1–33, 2 de Dezembro de 2020. doi: 10.3390/ma13245832.
- [12] C. Soutis, «Introduction: Engineering requirements for aerospace composite materials», em *Polymer Composites in the Aerospace Industry*, Elsevier Inc., 2014, pp. 1–18. doi: 10.1016/B978-0-85709-523-7.00001-3.
- [13] B. Tomas Astrom, *Manufacturing of Polymer Composites*. 1997. Acedido: 4 de Fevereiro de 2023. [Em linha]. Disponível em:

- [https://books.google.pt/books?id=O6Le2YLcYeYC&printsec=frontcover&source=gbs\\_book\\_other\\_versions\\_r&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.pt/books?id=O6Le2YLcYeYC&printsec=frontcover&source=gbs_book_other_versions_r&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
- [14] M. Kutz, «Handbook of Materials Selection», 2002, Acedido: 10 de Janeiro de 2023. [Em linha]. Disponível em:  
<https://books.google.com.br/books?hl=pt-PT&lr=&id=gWg-rchM700C&oi=fnd&pg=PA335&dq=types+of+synthetic+polymers+elastomers+thermoset+thermoplastic&ots=xKJ9pHSAvq&sig=NhYTRNpm35UT0WWrHFCRBXd9PMc#v=onepage&q=types%20of%20synthetic%20polymers%20elastomers%20thermoset%20thermoplastic&f=false>
- [15] British Plastics Federation (BPF), «Polycarbonate (PC)». <https://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/Polycarbonate.aspx> (acedido 15 de Dezembro de 2022).
- [16] Plastics Technology, «Versatile Polycarbonate in Different Industries». <https://www.plastics-technology.com/articles/versatile-polycarbonate-in-different-industries> (acedido 15 de Dezembro de 2022).
- [17] D. D. L. Chung, *Carbon Composites: Composites with Carbon Fibers, Nanofibers, and Nanotubes*, Second Edition. 1994. Acedido: 4 de Fevereiro de 2023. [Em linha]. Disponível em: [https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=OzL4CAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Chung+DDL+\(1994\)+Carbon+fiber+composites.+Butterworth-Heinemann,+Boston&ots=y2BE2Ou3Ti&sig=uFbs66wL4kU04zn4TOImgiUOFvc&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Chung%20DDL%20\(1994\)%20Carbon%20fiber%20composites.%20Butterworth-Heinemann%2C%20Boston&f=false](https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=OzL4CAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Chung+DDL+(1994)+Carbon+fiber+composites.+Butterworth-Heinemann,+Boston&ots=y2BE2Ou3Ti&sig=uFbs66wL4kU04zn4TOImgiUOFvc&redir_esc=y#v=onepage&q=Chung%20DDL%20(1994)%20Carbon%20fiber%20composites.%20Butterworth-Heinemann%2C%20Boston&f=false)
- [18] X. Huang, «Fabrication and properties of carbon fibers», *Materials*, vol. 2, n. 4, pp. 2369–2403, 2009. doi: 10.3390/ma2042369.
- [19] R. Sharma, K. K. Kar, M. K. Das, G. K. Gupta, e S. Kumar, «Short carbon fiber-reinforced polycarbonate composites», em *Composite Materials: Processing, Applications, Characterizations*, Springer Berlin Heidelberg, 2016, pp. 199–221. doi: 10.1007/978-3-662-49514-8\_6.
- [20] P. Alam, D. Mamalis, C. Robert, C. Floreani, e C. M. Ó Brádaigh, «The fatigue of carbon fibre reinforced plastics - A review», *Composites Part B: Engineering*, vol. 166. Elsevier Ltd, pp. 555–579, 1 de Junho de 2019. doi: 10.1016/j.compositesb.2019.02.016.
- [21] J. Schijve, «Fatigue of Structures and Materials», 2001.
- [22] W. D. Callister e D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An Introduction*.
- [23] J. Militky e S. Ibrahim, «Effect of textile processing on fatigue», em *Fatigue Failure of Textile Fibres*, Elsevier Inc., 2009, pp. 133–168. doi: 10.1533/9781845695729.2.133.
- [24] Y. Murakami, T. Takagi, K. Wada, e H. Matsunaga, «Essential structure of S-N curve: Prediction of fatigue life and fatigue limit of defective materials and nature of scatter», *Int J Fatigue*, vol. 146, Mai. 2021, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2020.106138.
- [25] L. Safai, J. S. Cuellar, G. Smit, e A. A. Zadpoor, «A review of the fatigue behavior of 3D printed polymers», *Additive Manufacturing*, vol. 28. Elsevier B.V., pp. 87–97, 1 de Agosto de 2019. doi: 10.1016/j.addma.2019.03.023.

- [26] B. Farahmand, G. Bockrath, e J. Glassco, *Fatigue and Fracture Mechanics of High Risk Parts*. Springer US, 1997. doi: 10.1007/978-1-4615-6009-8.
- [27] C. Vipulanandant e N. Dharmarajans, «CRITICAL CRACK TIP OPENING DISPLACEMENT FOR POLYMER COMPOSITES», 1989.
- [28] M. F. Borges, F. v. Antunes, P. A. Prates, R. Branco, e T. Vojtek, «Effect of Young's modulus on fatigue crack growth», *Int J Fatigue*, vol. 132, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2019.105375.
- [29] H. Mao e S. Mahadevan, «Fatigue damage modelling of composite materials». [Em linha]. Disponível em: [www.elsevier.com/locate/compstruct](http://www.elsevier.com/locate/compstruct)
- [30] K. S. R. Chandran, «Mechanical fatigue of polymers: A new approach to characterize the S-N behavior on the basis of macroscopic crack growth mechanism», *Polymer (Guildf)*, vol. 91, pp. 222–238, Mai. 2016, doi: 10.1016/j.polymer.2016.03.058.
- [31] R. J. Crawford e P. P. Benham, «Some fatigue characteristics of thermoplastics».
- [32] S. Mortazavian e A. Fatemi, «Fatigue behavior and modeling of short fiber reinforced polymer composites: A literature review», *Int J Fatigue*, vol. 70, pp. 297–321, 2015, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2014.10.005.
- [33] A. el Magri, K. el Mabrouk, S. Vaudreuil, e M. E. Touhami, «Mechanical properties of CF-reinforced PLA parts manufactured by fused deposition modeling», *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 34, n. 5, pp. 581–595, Mai. 2021, doi: 10.1177/0892705719847244.
- [34] J. Gockel, L. Sheridan, B. Koerper, e B. Whip, «The influence of additive manufacturing processing parameters on surface roughness and fatigue life», *Int J Fatigue*, vol. 124, pp. 380–388, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2019.03.025.
- [35] M. T. A. Ansari, K. K. Singh, e M. S. Azam, «Fatigue damage analysis of fiber-reinforced polymer composites—A review», *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 37, n. 9, pp. 636–654, Mai. 2018, doi: 10.1177/0731684418754713.
- [36] C. T. Sun e W. S. Chan, «Frequency Effect on Fatigue Life of a Laminate Composite», *Composite Materials: Testing and Design (Fifth Conference)*, pp. 418–430, 1979.
- [37] X. R. Xiao, «Modeling of load frequency effect on fatigue life of thermoplastic composites», *J Compos Mater*, vol. 33, n. 12, pp. 1141–1158, 1999, doi: 10.1177/002199839903301205.
- [38] W. Ferdous *et al.*, «Testing and modelling the fatigue behaviour of GFRP composites – Effect of stress level, stress concentration and frequency», *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 23, n. 5, pp. 1223–1232, Out. 2020, doi: 10.1016/j.jestch.2020.01.001.
- [39] J. A. Epaarachchi e P. D. Clausen, «An empirical model for fatigue behavior prediction of glass fibre-reinforced plastic composites for various stress ratios and test frequencies», *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 34, n. 4, pp. 313–326, 2003, doi: 10.1016/S1359-835X(03)00052-6.
- [40] S. Valvez, A. P. Silva, P. N. B. Reis, e F. Berto, «Annealing effect on mechanical properties of 3D printed composites», em *Procedia Structural Integrity*, 2022, vol. 37, n. C, pp. 738–745. doi: 10.1016/j.prostr.2022.02.004.

- [41] S. Bhandari, R. A. Lopez-Anido, e D. J. Gardner, «Enhancing the interlayer tensile strength of 3D printed short carbon fiber reinforced PETG and PLA composites via annealing», *Addit Manuf*, vol. 30, Dez. 2019, doi: 10.1016/j.addma.2019.100922.
- [42] R. A. Wach, P. Wolszczak, e A. Adamus-Włodarczyk, «Enhancement of Mechanical Properties of FDM-PLA Parts via Thermal Annealing», *Macromol Mater Eng*, vol. 303, n. 9, Set. 2018, doi: 10.1002/mame.201800169.
- [43] N. Yu, X. Sun, Z. Wang, D. Zhang, e J. Li, «Effects of auxiliary heat on warpage and mechanical properties in carbon fiber/ABS composite manufactured by fused deposition modeling», *Mater Des*, vol. 195, Out. 2020, doi: 10.1016/j.matdes.2020.108978.
- [44] Q. Meng, Y. Gu, L. Luo, S. Wang, M. Li, e Z. Zhang, «Annealing effect on crystalline structure and mechanical properties in long glass fiber reinforced polyamide 66», *J Appl Polym Sci*, vol. 134, n. 23, Jun. 2017, doi: 10.1002/app.44832.
- [45] P. A. Kumar Jain, S. Sattar, D. Mulqueen, D. Pedrazzoli, S. G. Kravchenko, e O. G. Kravchenko, «Role of annealing and isostatic compaction on mechanical properties of 3D printed short glass fiber nylon composites», *Addit Manuf*, vol. 51, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.addma.2022.102599.
- [46] «PC-TDS-v03».
- [47] «PC\_CF-TDS-v03».
- [48] K. Lisa Yang Center for Conservation Bioacoustics, «Elephant Listening Project Home». <https://elephantlisteningproject.org/all-about-infrasound/> (acedido 12 de Fevereiro de 2023).