



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Nuno Miguel Gonçalves Almeida

**EFEITO DE SOBRECARGAS NO  
COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO DE UM  
COMPÓSITO GFRP**

**Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, na área de Produção e Projeto, orientada pelo Professor Doutor Paulo Nobre Balbis dos Reis e pelo Professor Doutor Ricardo Nuno Madeira Soares Branco e apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.**

Outubro de 2021



1 2



9 0

FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

## **Efeito de sobrecargas no comportamento viscoelástico de um compósito GFRP**

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

### **Effect of pre-loads in the viscoelastic behavior of a GFRP composite**

**Autor**

**Nuno Miguel Gonçalves Almeida**

**Orientadores**

**Paulo Nobre Balbis dos Reis**

**Ricardo Nuno Madeira Soares Branco**

**Júri**

|                   |  |
|-------------------|--|
| <b>Presidente</b> | <b>Professora Doutora Ana Paula Bettencourt Martins Amaro</b><br><b>Professora Auxiliar com Agregação da Universidade de Coimbra</b><br><b>Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa</b> |
| <b>Vogais</b>     | <b>Professor Associado com Agregação da Universidade de Coimbra</b>  |
| <b>Orientador</b> | <b>Professor Doutor Paulo Nobre Balbis dos Reis</b><br><b>Professor Associado da Universidade de Coimbra</b>   |

**Coimbra, Dezembro, 2021**

Aos meus pais

## Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

Ao meu orientador Professor Paulo Nobre Balbis dos Reis por toda a ajuda e disponibilidade demonstrada durante todo o processo, quer na parte experimental quer na escrita da dissertação.

Ao meu orientador Professor Ricardo Nuno Madeira Soares Branco pelo enquadramento e direcionamento para a realização desta dissertação.

A todos os colegas que fizeram parte do meu percurso durante estes 5 anos e com quem criei amizades e momentos que nunca serão esquecidos.

Aos meus pais por todo o sacrifício e apoio incondicional durante este tempo todo, tornando assim esta fase final possível.

Ao meu irmão por todo o apoio e conselhos durante o meu percurso académico.

Um reconhecimento a todos os professores e funcionários que auxiliaram a realização deste trabalho.

---

## Resumo

Os materiais compósitos têm sido cada vez mais utilizados nos diversos campos industriais devido às suas características intrínsecas como resistência e rigidez específica. Setores como a indústria aeronáutica, civil ou naval utilizam materiais compósitos com vista a substituir os tradicionais materiais metálicos.

Assim, o objetivo do presente estudo é analisar o comportamento viscoelástico de um material compósito, constituído por uma matriz epoxídica reforçada com fibras de vidro, quando sujeito a pré-cargas. Este estudo leva a uma melhor compreensão das propriedades viscoelásticas do material com vista a retirar o seu melhor desempenho em serviço.

Inicialmente, determinou-se a resistência mecânica do material em estudo com recurso a provetes normalizados. Posteriormente, estudou-se o comportamento viscoelástico do material através de ensaios de relaxação de tensões e fluência, para valores correspondentes a 40% e 60% da tensão de rotura. Com base nestas condições, concluiu-se que os provetes ensaiados a 40% da tensão de rotura apresentaram maior relaxação e maior fluência do que os provetes ensaiados a 60%. Aplicou-se, posteriormente, uma pré-carga de 20% e 40% sobre os valores anteriormente considerados (40% e 60% da tensão de rotura), tendo os provetes sido novamente sujeitos a ensaios de relaxação de tensões e fluência. Verificou-se que quanto maior a pré-carga induzida ao material menor será a relaxação de tensões e a fluência.

Por fim, foi avaliada a resistência residual de todas as amostras ensaiadas, verificando-se que as amostras ensaiadas em relaxação de tensões apresentam maior resistência residual comparativamente às ensaiadas à fluência para as mesmas condições de carregamento e pré-carregamento.

**Palavras-chave:** Laminados vidro/epoxídica, Comportamento viscoelástico, Relaxação de tensões, Fluência, Resistência Residual

## Abstract

Composite materials have been more and more used in the most diverse industrial fields due to their intrinsic characteristics like specific stiffness and strength. Sectors like aeronautical industry, civil or naval make use of these materials with the goal to replace traditional metallic materials.

With that in mind, the subject matter of this study is to analyze the viscoelastic behavior of a composite material, formed by epoxy matrix reinforced with glass fibers, when subjected to pre-loads. This study leads to a better understanding of the viscoelastic properties of the material to withdraw its best service performance.

Initially, it was determined the maximum tensile strength of the material by means of standardized samples. Later, the viscoelastic behaviour was studied by stress relaxation and creep tests, for values corresponding 40% and 60% of the material tensile strength. Based on these conditions, it was concluded that the samples tested at 40% of the tensile strength showed more stress relaxation and creep than the samples tested at 60%. Subsequently, it was applied a pre-load of 20% and 40% under the values previously considered (40% and 60% of the tensile strength), having the specimens again submitted to stress relaxation and creep tests. It was verified that the bigger the pre-load induced to the material, the less stress relaxation and creep.

Finally, it was evaluated the residual strength of all the samples tested, verifying that the samples tested for stress relaxation present more residual strength in comparison of creep test samples with the same load and pre-load conditions.

**Keywords** Glass/epoxy laminates, Viscoelastic behaviour, Stress Relaxation, Creep, Residual Strength

## 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. Estrutura.....  | 2    |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....  | 3    |
| 2.1. Compósitos .....  | 3    |
| 2.2. Compósitos de matriz epoxídica reforçada com fibra de vidro ..... | 4    |
| 2.2.1. Matriz Epoxídica .....  | 5    |
| 2.2.2. Reforço de Fibra de Vidro .....                                 | 6    |
| 2.3. Viscoelasticidade em compósitos .....                             | 7    |
| 2.3.1. Relaxação de Tensões.....                                       | 8    |
| 2.3.2. Fluência .....  | 10   |
| 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....                                     | 15   |
| 3.1. Material.....   | 15   |
| 3.2. Geometria dos provetes de ensaio .....                            | 16   |
| 3.3. Metodologia de ensaio .....                                       | 17   |
| 4. ANÁLISE DE RESULTADOS.....  | 21   |
| 4.1. Caracterização estática.....                                      | 21   |
| 4.2. Estudo de Relaxação de Tensões .....                              | 22   |
| 4.3. Estudo de Fluência.....   | 26   |
| 4.4. Resistência Residual .....  | 30   |
| 5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....               | 34   |
| 5.1. Conclusões .....  | 34   |
| 5.2. Recomendações para Trabalhos Futuros .....                        | 35   |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                       | 36   |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 2.1.</b> Materiais constituintes de um avião Boeing 787 [4]. .....  | 4  |
| Figura 2.2. Efeito da orientação das fibras num compósito poliamida/vidro [18]. .....   | 9  |
| Figura 2.3. Curvas de Relaxação em diferentes ambientes hostis [19]. .....  | 9  |
| Figura 2.4. Comparação entre a curva experimental e a previsão do modelo KKW para: a) Laminados Kevlar e uma tensão de flexão de 150 MPa; b) Laminados de carbono e uma tensão de flexão de 400 MPa [20]. .....             | 10 |
| Figura 2.5. Caracterização gráfica das três fases de fluência[21]. .....  | 11 |
| Figura 2.6. Curvas de fluência para uma resina epoxídica a 40°C, 35°C, 30°C e 25°C [22]. .....  | 12 |
| Figura 2.7. Fluência em compósitos WPC a várias temperaturas [23]. .....  | 13 |
| Figura 2.8. Comparação entre a curva experimental e a previsão pelo modelo de Findley para: a) Laminados de Kevlar e uma tensão de flexão de 150 MPa; b) Laminados de carbono e uma tensão de flexão de 400 MPa [20]. ..... | 14 |
| Figura 3.1. Geometria e dimensões dos provetes utilizados nos ensaios. ....   | 16 |
| Figura 3.2. Máquina de Tração SHIMADZU Modelo Autograph AGS-X. ....   | 17 |
| Figura 3.3. Exemplo de uma curva de relaxação de tensões. ....  | 19 |
| Figura 3.4. Exemplo de uma curva de fluência. ....  | 19 |
| Figura 4.1. Curvas tensão - deformação para as três amostras ensaiadas. ....  | 21 |
| Figura 4.2. Curvas de relaxação de tensões para uma tensão inicial de 153 MPa. ....   | 22 |
| Figura 4.3. Curva média de relaxação de tensões para uma tensão inicial de 153 MPa. ....  | 23 |
| Figura 4.4. Curva média de relaxação de tensões para uma tensão inicial de 230 MPa. ....  | 23 |
| Figura 4.5. Comparação entre as duas curvas de relaxação. ....  | 24 |
| Figura 4.6. Curvas de relaxação com e sem pré-cargas para uma tensão inicial de 153 MPa. ....   | 25 |
| Figura 4.7. Curvas de relaxação com e sem pré-cargas para uma tensão inicial de 230 MPa. ....   | 25 |
| Figura 4.8. Curvas de fluência para 3 provetes de controlo para uma tensão de 230 MPa. ....   | 26 |
| Figura 4.9. Curva média de fluência para uma tensão de 153 MPa. ....  | 27 |
| Figura 4.10. Curva média de fluência para uma tensão de 230 MPa. ....   | 27 |
| Figura 4.11. Comparação das curvas de fluência para as diferentes tensões. ....   | 28 |
| Figura 4.12. Curvas de fluência com e sem pré-cargas para uma tensão de 153 MPa. ....   | 29 |

---

|  |    |
|--|----|
| Figura 4.13. Curvas de fluência com e sem pré-cargas para uma tensão de 230 MPa.....                 | 29 |
| Figura 4.14. Resistência residual para os provetes de controlo sem aplicação de pré-cargas.<br>..... | 31 |
| Figura 4.15. Resistência residual dos provetes sujeitos a relaxação de tensões.....                  | 32 |
| Figura 4.16. Resistência residual dos provetes sujeitos a fluência.....                              | 32 |

## ÍNDICE DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 2.1. Propriedades da resina epoxídica LY 556 [11].....  | 5  |
| Tabela 2.2. Composição química de algumas classes de fibras de vidro em percentagem de massa [12]..... | 6  |
| Tabela 2.3. Propriedades mecânicas de algumas classes de fibras de vidro [12].....                     | 6  |
| Tabela 3.1. Propriedades da resina de epóxido .....  | 16 |
| Tabela 4.1. Tensões de rotura e respetivo valor médio. ....  | 21 |
| Tabela 4.2. Tensão Final e Redução em Percentagem dos Provetes Ensaiaados.....                         | 25 |
| Tabela 4.3. Percentagem de deformação dos provetes ensaiados. ....                                     | 30 |

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$\beta$ – Grau de não-exponencialidade da função de relaxação

$\varepsilon$  – Deformação

$\varepsilon(t)$  – Deslocamento no instante t

$\varepsilon_0$  – Deslocamento elástico instantâneo

$\eta$  – Coeficiente de viscosidade

$\rho$ – Densidade

$\sigma$  – Tensão

$\sigma_0$ – Tensão no instante t=0

$\sigma_R$ – Tensão de rotura

$\sigma(t)$ – Tensão no instante t

$\tau$ – Tempo de relaxação

$\emptyset$ – Função de relaxação

$A$ – Amplitude de fluência transiente

$A_t$ – Área transversal da zona útil do provete

$E$  – Módulo de Elasticidade

$l$ – Comprimento da amostra

$l_0$ – Comprimento inicial da amostra

$n$ – Constante independente da tensão

$P$ – Carga

$T_g$ – Temperatura de transição vítrea

## **Siglas**

CFRP – Carbon fiber reinforced polymer

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

FRP – Fiber reinforced polymer

GFRP – Glass fiber reinforced polymer

KKW - Kohlrausch-Williams-Watts

## 1. INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos são cada vez mais relevantes para os mais diversos campos industriais. Basicamente resultam da junção de dois ou mais materiais de natureza diferente para a obtenção de um material de características superiores às dos seus constituintes, podendo, assim, dizer-se que eles acabaram por definir uma nova classe de materiais.

Atualmente, os compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras tornam-se cada vez mais atrativos para os diferentes setores da mobilidade, como, por exemplo, a indústria automóvel, aeronáutica ou naval. Isto resulta essencialmente das suas características intrínsecas como a rigidez e resistência específica, bem como facilidade de fabrico. Devido a estas propriedades inerentes a este tipo de material, a substituição de metais por compósitos é cada vez mais frequente. No entanto, outras propriedades como a boa resistência à corrosão e resistência química também levam a que se tornem uma das principais opções no desenvolvimento de próteses e implantes dentários.

Apesar da presença de um polímero como matriz de um compósito aumentar a complexidade ao nível da compreensão do comportamento mecânico dos *fiber reinforced polymers*, ou FRP, não se pode desprezar a enorme vantagem que se pode retirar da sua capacidade adesiva. Por exemplo, os polímeros induzem comportamentos viscoelásticos, mesmo à temperatura ambiente, os quais não podem ser ignorados para fins de projeto. Neste contexto, ainda que a literatura reporte vários estudos sobre relaxação de tensões e fluência de diversos materiais compósitos de matriz polimérica, ela não apresenta nenhum trabalho que estude o efeito das sobrecargas nestes tipos de carregamentos estáticos.

Assim, esta dissertação pretende estudar o efeito das pré-cargas no comportamento viscoelástico de um compósito vidro/epoxídica. Para este fim, serão realizados ensaios de relaxação de tensões e fluência em provetes com diferentes pré-cargas, sendo os resultados analisados e discutidos.

## 1.1. Objetivos

O presente trabalho teve como principal objetivo avaliar o comportamento de um compósito vidro/epoxídica ao nível da relaxação de tensões e fluência após ter sido sujeito a pré-cargas.

Para este propósito, determinou-se numa primeira fase a tensão de rotura do material em estudo, utilizando, posteriormente, este valor para definir as pré-cargas de referência. Numa segunda etapa foram realizados ensaios de relaxação de tensões e fluência em provetes previamente sujeitos a tensões correspondentes a 40% e 60% da tensão de rotura. Seguidamente, novos provetes foram submetidos a pré-cargas de 20% e 40% sobre os valores anteriormente considerados e também submetidos a ensaios de relaxação de tensões e fluência. Finalmente foi avaliada a resistência residual dos provetes ensaiados para todas as condições de carregamento impostas.

## 1.2. Estrutura

Com vista a cumprir o objetivo anteriormente descrito, a presente dissertação está dividida em 5 capítulos:

- O primeiro capítulo, "INTRODUÇÃO", apresenta um breve resumo do tema em estudo, assim como os objetivos definidos e o corpo estrutural da mesma;
- O segundo capítulo, "REVISÃO BIBLIOGRÁFICA", apresenta a literatura existente e que se encontra relacionada com o tema em estudo, para além de serem introduzidos todos os conceitos abordados neste trabalho como viscoelasticidade, relaxação de tensões e fluência;
- O terceiro capítulo, "PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL", descreve o material utilizado e suas propriedades, assim como a geometria dos provetes utilizados nos ensaios e a metodologia utilizada;
- O quarto capítulo, "ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS", apresenta todos os resultados obtidos e a sua discussão;
- Finalmente o quinto capítulo, "CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS", apresenta as conclusões retiradas do presente estudo e algumas recomendações para trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta secção destina-se a apresentar e definir alguns conceitos teóricos intrínsecos ao desenvolvimento deste estudo, de forma a obter uma melhor compreensão por parte do leitor. Fluência, relaxação de tensões e viscoelasticidade serão alguns conceitos abordados por este capítulo.

### 2.1. Compósitos

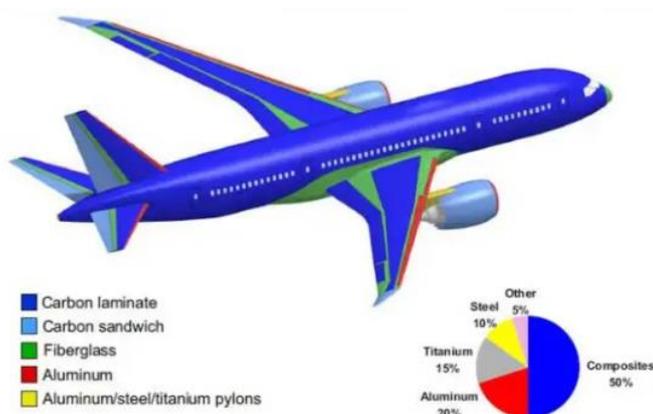
Um material compósito é um material multifásico fabricado artificialmente. As fases constituintes destes materiais têm de ser quimicamente diferentes e separadas por uma interface distinta. Muitos compósitos usados na maioria das indústrias são apenas compostos por duas fases, uma delas sendo definida como matriz, que pode ser metálica, polimérica ou cerâmica, normalmente rodeada pela outra fase denominada como a fase dispersa. Esta fase pode ser classificada como reforço de partículas, reforço de fibra ou reforço estrutural [1].

As grandes vantagens desta classe de materiais estão inerentes às suas propriedades mecânicas. A baixa massa, o baixo custo, a facilidade de fabrico e processamento, a alta resistência química e resistência à corrosão, bem como a flexibilidade dimensional são características muito vantajosas e que levam à sua preferência em substituição dos metais e ligas metálicas. No entanto, este tipo de material tem uma caracterização mecânica e um processo de reparação mais complexo, bem como um processo de fabrico mais dispendioso do que um material metálico [2].

Setores como a indústria aeronáutica, militar, engenharia civil, medicina, desporto ou recreativa fazem uso frequente deste material. Na construção de aviões, por exemplo, o uso de polímeros reforçados de fibras de carbono, ou CFRP, permite à aeronave ser mais leve, para além de uma alta resistência à corrosão. Na indústria automóvel, a introdução de materiais compósitos como alternativa aos materiais metálicos foi bem sucedida sobretudo nos componentes estruturais do veículo. Por exemplo, os carros da Fórmula 1 fazem uso destes materiais. No setor desportivo é possível observar a relevância dos compósitos na construção de bicicletas, raquetes de ténis, tacos de golf ou pranchas de surf. Na medicina, especificamente na ortopedia e medicina dentária, os compósitos devido

aos seu baixo peso, elevada resistência à fadiga e corrosão, são extremamente importantes na construção de próteses ou de implantes dentários [3].

A Figura 2.1 ilustra a influência dos materiais compósitos na constituição de um avião Boeing 787 [4].



**Figura 2.1.** Materiais constituintes de um avião Boeing 787 [4].

## 2.2. Compósitos de matriz epoxídica reforçada com fibra de vidro

Os compósitos epóxi/vidro são compósitos pertencentes à classe de polímeros reforçados por fibras de vidro, ou *glass fiber-reinforced polymers*(GFRP). Esta classe, é uma das mais utilizadas nos diversos campos de engenharia, seja a nível industrial, civil, automóvel ou aeronáutico.

Este material faz uso de uma matriz polimérica, a resina epoxídica, reforçada com fibra de vidro. Comparativamente a outro compósito semelhante como o caso dos polímeros reforçados com fibra de carbono, ou *carbon fiber-reinforced polymers*(CFRP), embora o GFRP apresenta maior densidade que o CFRP ele é mais barato e a fibra de vidro atua como isolante elétrico e térmico. Na literatura existente, pode-se encontrar vários estudos comparativos entre estes dois tipos de compósitos, constituídos também por uma matriz epoxídica, ao nível da resistência à tração, flexão e impacto para diferentes temperaturas [5]. O CFRP apresenta propriedades mecânicas mais elevadas do que os compósitos reforçados com fibras de vidro, ainda que este último apresente maior deformação. As estruturas internas pós-fratura também foram estudadas recorrendo à microscopia ótica, tendo sido observado que a orientação das fibras tem um papel muito importante no comportamento mecânico destes dois compósitos.

Os mecanismos de falha dos materiais compósitos reforçados por fibras dependem do tipo de carregamento, ou seja, tração, compressão, impacto e fadiga. Em tração, quando uma força é aplicada a 90° do laminado, uma fratura interlaminar pode ocorrer originando conseqüentemente uma propagação de fenda [6]. Em compressão são descritos quatro modos de falha para os FRP, esmagamento de fibras, micro-encurvadura elástica, falha da matriz e micro-encurvadura plástica [7]. Uma força de impacto resulta no esmagamento de ambas as fibras e matriz na área de impacto, ao mesmo tempo que surge no laminado falhas de corte interlaminares, resultando em delaminações [8]. Na fadiga, observa-se três fases em laminados com camadas cruzadas, ou *cross-ply*. A primeira fase é a fissuração da matriz, seguido de delaminação e concluindo com a rotura das fibras [9].

### 2.2.1. Matriz Epoxídica

As resinas epoxídicas são as mais utilizadas como matriz de um compósito. Segundo [10] estas resinas são da família de plásticos termoendurecíveis, as quais não produzem produtos de reação quando submetidos ao processo de cura, tendo conseqüentemente pouco encolhimento na pós-cura. Este polímero apresenta boa adesão a outros materiais, boa resistência à corrosão, boas propriedades químicas e boas propriedades isolantes. Num material compósito reforçado por fibras, a resina epoxídica detém várias funções como a distribuição de tensões pelas fibras, sendo a resina também responsável por suportar um pouco das tensões aplicadas nos carregamentos, proteger as fibras de quaisquer danos superficiais resultantes de reações químicas com o ambiente ou abrasão e também prevenir a propagação de fendas entre fibras [11].

Na Tabela 2.1 é apresentado algumas propriedades da resina de epóxido LY-556.

**Tabela 2.1.** Propriedades da resina epoxídica LY 556 [11].

| <b>Características</b>           | <b>Propriedades</b>              |
|----------------------------------|----------------------------------|
| Aspetto                          | Líquido amarelo-pálido           |
| Quantidade de Epóxido (ISO 3000) | 5,30 – 5,45 [eq/kg]              |
| Viscosidade a 25°C (ISO 9371B)   | 1000 – 1200 [MPa.s]              |
| Densidade a 25°C (ISO 1675)      | 1,15 – 1,20 [g/cm <sup>3</sup> ] |
| Ponto de Queima (ISO 2719)       | >200 [°C]                        |
| Temperatura de Armazenamento     | 2 – 40 [°C]                      |

### 2.2.2. Reforço de Fibra de Vidro

O comportamento mecânico de um dado compósito não só depende da resistência e módulo de elasticidade do seu reforço, como também da sua ligação com a matriz. As fibras de vidro são das mais utilizadas na construção de materiais compósitos, quer pela sua adesão com a matriz, quer pelas suas características mecânicas, como a boa resistência química e elevada resistência mecânica específica. Outra grande vantagem é o seu custo, especialmente em relação a outras fibras como as de carbono.

As fibras de vidro são, normalmente, constituídas à base de sílica e óxidos, como o óxido de cálcio, de alumínio ou de ferro, dependendo da sua finalidade. Posteriormente são sujeitas a tratamentos superficiais.

A classificação destas fibras varia conforme a composição química e a sua propriedade física. As fibras de vidro estão agrupadas em 8 tipos, A, C, D, E, AR, R, S e S-2 [12]. Comparativamente, os tipos A e E apresentam elevada resistência mecânica e elétrica, os tipos C e R têm elevada resistência à corrosão e o tipo S apresenta elevada resistência à tração. Na Tabela 2.2 e Tabela 2.3 é possível observar a diferença entre as fibras de vidro a nível de composição e propriedades mecânicas.

**Tabela 2.2.** Composição química de algumas classes de fibras de vidro em percentagem de massa [12].

| Tipo    | (SiO <sub>2</sub> ) | (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | (B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | (CaO) | (MgO) |
|---------|---------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-------|-------|
| Vidro E | 55,0                | 14,0                              | 7,0                              | 22,0  | 1,0   |
| Vidro A | 67,5                | 3,5                               | 1,5                              | 6,5   | 4,5   |
| Vidro C | 64,6                | 4,1                               | 5,0                              | 13,4  | 3,3   |
| Vidro S | 65,9                | 25,0                              | -                                | -     | 10,0  |

**Tabela 2.3.** Propriedades mecânicas de algumas classes de fibras de vidro [12].

| Tipo                 | Densidade [g/cm <sup>3</sup> ] | Resistência à tração [GPa] | Módulo de Young [GPa] | Coefficiente de expansão térmica [10 <sup>-7</sup> /°C] | Coefficiente de Poisson |
|----------------------|--------------------------------|----------------------------|-----------------------|---|-------------------------|
| Vidro E              | 2,58                           | 3,445                      | 72,3                  | 54  | 0,2                     |
| Vidro A              | 2,44                           | 3,310                      | 68,9                  | 73  | -                       |
| Vidro C              | 2,52                           | 3,310                      | 68,9                  | 63  | -                       |
| Vidro S <sub>2</sub> | 2,46                           | 3,890                      | 86,9                  | 16  | 0,22                    |

### 2.3. Viscoelasticidade em compósitos

Os materiais compósitos de matriz polimérica apresentam um comportamento mecânico muito dependente do tempo devido às características viscoelásticas da matriz destes materiais.

A viscoelasticidade de um material é a capacidade do material apresentar características elásticas e viscosas durante o processo de deformação, sendo o resultado do processo de difusão de átomos e moléculas num material amorfo. Esta propriedade mecânica pode trazer benefícios ou prejudicar o desempenho mecânico de um compósito, sendo que um dos benefícios é o seu papel relevante na redução de tensões residuais que são induzidas nas lâminas durante o processo de cura [13] e a sua influência na fadiga do material [14].

Este comportamento mecânico pode classificar-se em comportamento viscoelástico linear, em que a tensão e a deformação são proporcionais durante o tempo e se o princípio da sobreposição de Boltzmann se aplicar, e em comportamento viscoelástico não-linear [15], responsáveis pelos fenómenos de fluência e relaxação de tensões que serão aprofundados nas secções 2.3.1 e 2.3.2.

A linearidade viscoelástica reflete o comportamento de um material ideal. Portanto, alguns modelos como o modelo *Spring* para comportamento elástico, *dashpot* para comportamento viscoso, ou os modelos de Kelvin e de Maxwell são modelos de baixa complexidade que conferem um grau de aproximação relativamente aceitável na análise da viscoelasticidade de polímeros em condições de baixas temperaturas e tensões reduzidas.

O modelo *Spring* é um modelo baseado na lei de Hooke, representado na equação 2.1.

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (2.1)$$

em que  $E$  representa o módulo de Young,  $\sigma$  a tensão e  $\varepsilon$  a deformação. Este modelo fundamenta que o material tem elasticidade instantânea assim como recuperação da configuração original instantânea, algo que não é verídico nas aplicações reais.

O modelo *dashpot* é um modelo de comportamento viscoso representado pela equação 2.2.

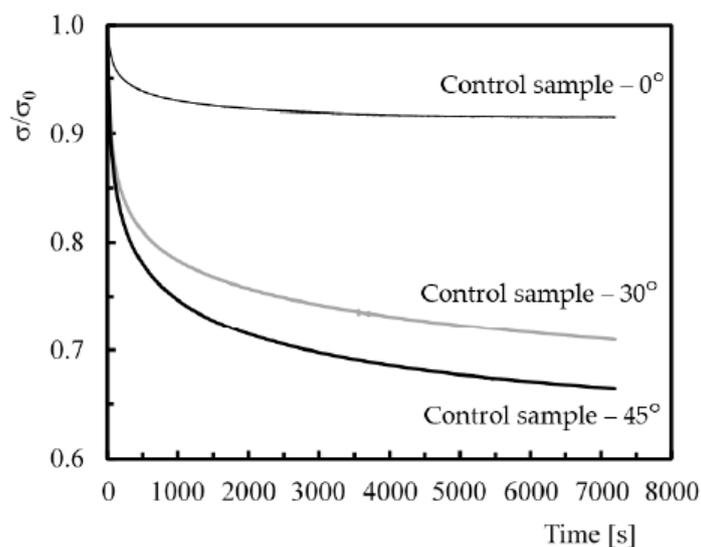
$$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (2.2)$$

onde  $\sigma$  é a tensão,  $\eta$  o coeficiente de viscosidade e  $\frac{d\varepsilon}{dt}$  a taxa de deformação. Esta equação mostra que a taxa de deformação é proporcional à tensão, ou seja, o *dashpot* vai ser deformado continuamente a uma taxa constante quando sujeito a uma tensão igualmente constante. Os modelos de Kelvin e de Maxwell são modelos que fazem a conjugação dos dois modelos descritos anteriormente para a previsão do comportamento viscoelástico de um material.

### 2.3.1. Relaxação de Tensões

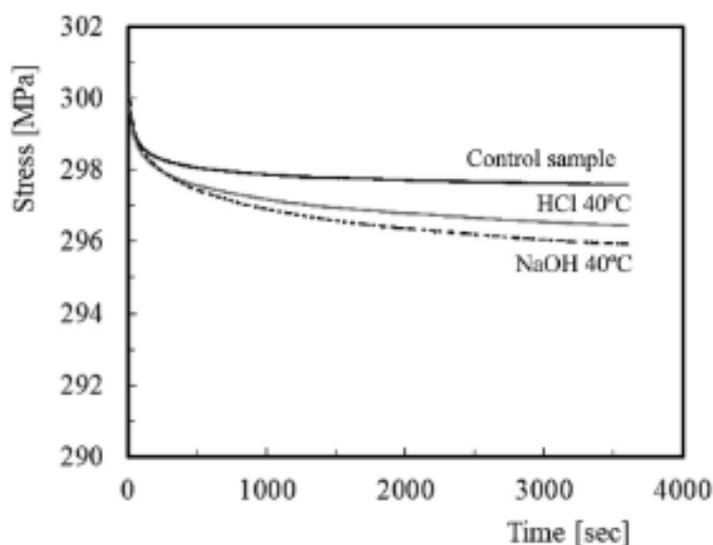
O fenómeno de relaxação de tensões, por definição, é a diminuição progressiva da tensão ao longo do tempo num determinado material quando sujeito a uma deformação constante. Estudos sobre este fenómeno revelam a importância de compreender o comportamento viscoelástico de materiais, nomeadamente polímeros e compósitos com matriz polimérica. A curva de relaxação de tensões é obtida a partir de ensaios realizados numa máquina de tração/compressão onde o provete é sujeito a uma deformação fixa num intervalo de tempo pré-determinado, posteriormente apresentada num gráfico de tensão em função do tempo. Um exemplo desta curva pode ser observado na Figura 3.3 do capítulo seguinte.

Na literatura existente, estudos mostram que a adição de fibras a um polímero viscoelástico geralmente atrasa o processo de relaxação [16]. Uma das razões apresentadas para explicar este fenómeno refere que a introdução de fibras dificulta o fluxo molecular na interface do compósito desacelerando a relaxação da matriz polimérica [17]. A orientação das fibras e a exposição a ambientes hostis influencia também a relaxação de tensões em compósitos reforçados por fibras de vidro, sendo que quanto maior o ângulo de alinhamento das fibras, maior a relaxação (Figura 2.2) [18].



**Figura 2.2.** Efeito da orientação das fibras num compósito poliamida/vidro [18].

Em termos de exposição a ambientes hostis, tanto o ambiente como o tempo de exposição influenciam a resposta ao nível da relaxação de tensões. Por exemplo, a literatura reporta que as soluções alcalinas promovem maior relaxação de tensões do que as soluções ácidas [19]. Esta comparação está ilustrada na Figura 2.3.



**Figura 2.3.** Curvas de Relaxação em diferentes ambientes hostis [19].

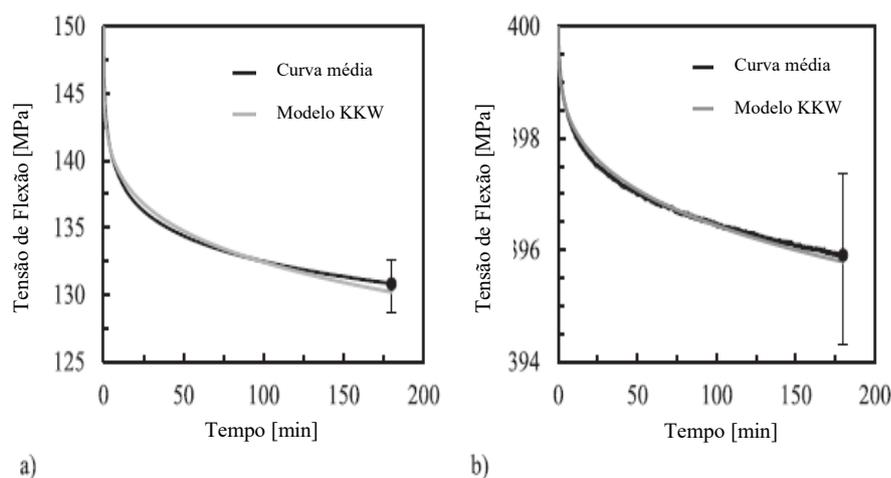
O efeito da temperatura na relaxação de um compósito GFRP de matriz epoxídica também não pode ser ignorado. Estudos mostram que o aumento da temperatura causa uma maior redução de tensões em laminados de GFRP e CFRP [19]. Os laminados de CFRP evidenciam maior resistência à relaxação térmica que os de GFRP a temperaturas

acima da temperatura de transição vítrea, sendo aproximadamente iguais para temperaturas inferiores. Outra conclusão retirada passa pela redução de tensões ser gradual nos laminados CFRP, contrariamente à redução abrupta observada nos laminados GFRP.

Além de ensaios experimentais, a bibliografia também apresenta modelos de previsão para a resposta viscoelástica, em termos de relaxação de tensões, mais complexos que os sistemas *Spring* ou *Dashpot* apresentados no início desta secção. Um dos modelos presentes na literatura é o modelo de Kohlrausch-Williams-Watts [20], também denominado como modelo KKW onde a função de relaxação  $\phi$  é dada pela equação 2.3.

$$\phi = \frac{\sigma(t)}{\sigma_0} = e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^\beta}, \quad (2.3)$$

onde  $\sigma(t)$  e  $\sigma_0$  representam, respetivamente, a tensão num instante  $t$  e a tensão em  $t = 0$ ,  $\beta$  o grau de não-exponencialidade da função de relaxação e  $\tau$  o tempo de relaxação relativo ao modelo KKW. Neste estudo é possível observar a aproximação das curvas de relaxação entre o método experimental e os métodos analíticos com base no modelo KKW para compósitos reforçados com fibras de kevlar e carbono (ver Figura 2.4).

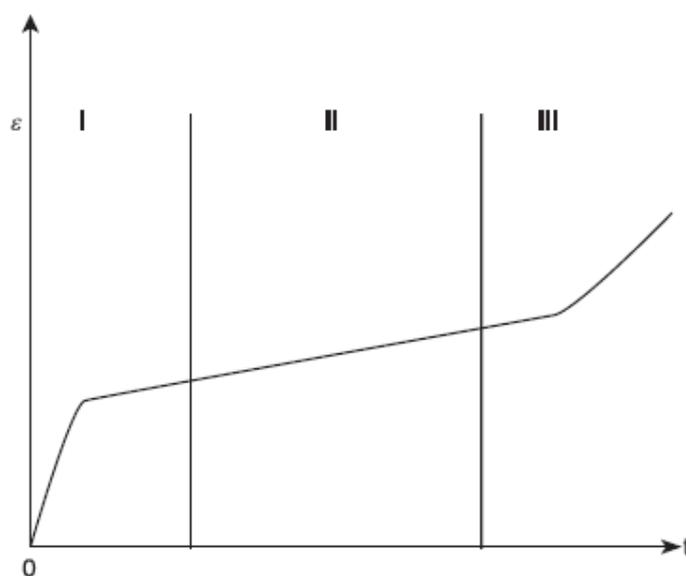


**Figura 2.4.** Comparação entre a curva experimental e a previsão do modelo KKW para: a) Laminados Kevlar e uma tensão de flexão de 150 MPa; b) Laminados de carbono e uma tensão de flexão de 400 MPa [20].

### 2.3.2. Fluência

O fenómeno de fluência é definido como um aumento da deformação do material durante o tempo, quando submetida a uma tensão ou carga constante. Carga que pode ser de tração, compressão ou flexão. Ao contrário dos materiais metálicos, polímeros e compósitos de matriz polimérica são afetados por este fenómeno à temperatura ambiente.

De forma geral, a fluência pode ser descrita em três fases. Na primeira fase, o material sofre deformação a uma taxa decrescente, seguida de uma segunda fase onde a deformação é relativamente constante e termina com a terceira fase onde a taxa de deformação é crescente e culmina com a fratura do material [21]. Na Figura 2.5 está uma representação esquemática deste fenómeno, com a deformação em função do tempo. Outro exemplo de uma curva de fluência está ilustrado no terceiro capítulo na Figura 3.4.



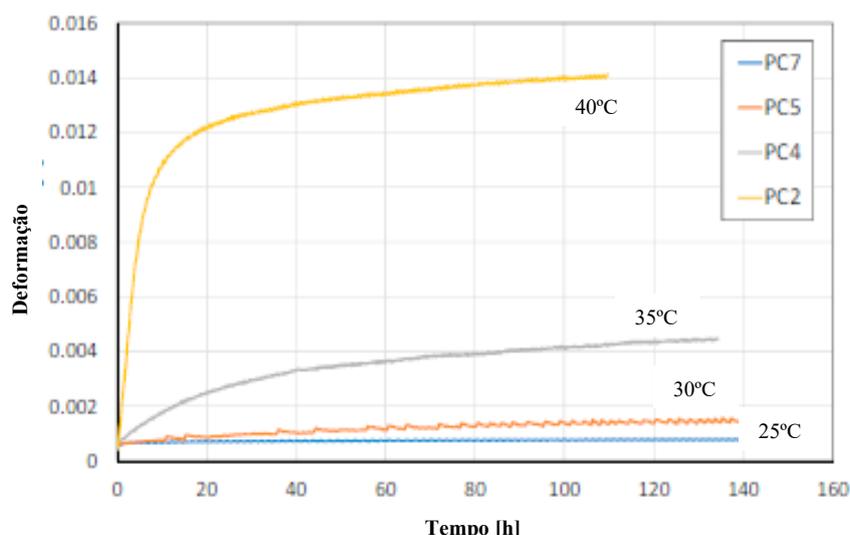
**Figura 2.5.** Caracterização gráfica das três fases de fluência[21].

É importante referir que as três fases descritas anteriormente destinam-se a vidas longas, não sendo aplicadas ao material em estudo no presente trabalho, o qual apenas apresentará as duas primeiras fases.

Esta propriedade viscoelástica é inerente à natureza dos materiais poliméricos devido às suas propriedades microscópicas, pois as suas cadeias moleculares são móveis e não compartilham ligações químicas com as outras cadeias à volta. Os dois principais fatores que afetam o comportamento à fluência dos polímeros é a temperatura e a taxa de deformação. Quando a temperatura aumenta, as cadeias poliméricas ficam mais distantes entre si, originando maior volume livre e a energia cinética promove o desarranjo das cadeias relativamente às outras mais facilmente. Ao ritmo que a taxa de deformação aumenta, as cadeias poliméricas ficam sem tempo suficiente para cederem, favorecendo assim o desarranjo. Estes fatores, consequentemente, podem vir a provocar a rotura por fluência, devido à formação e propagação de fissuras com o tempo e para carregamentos constantes.

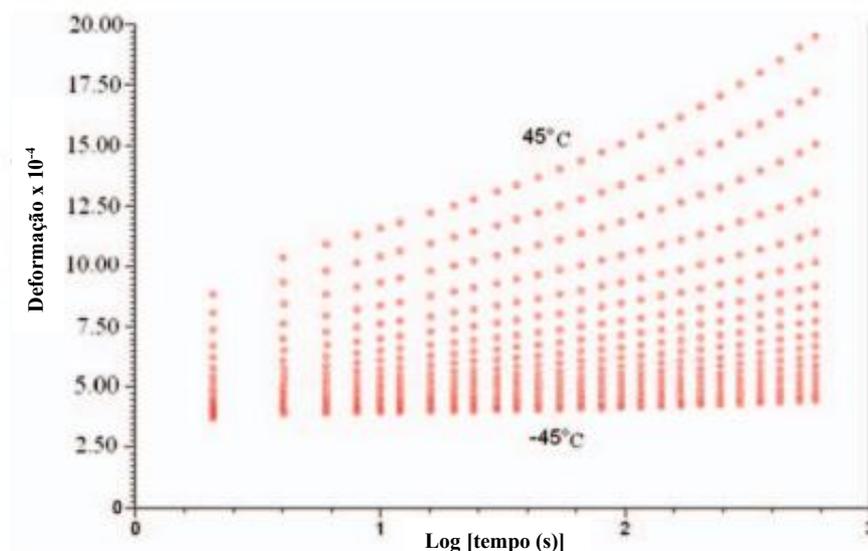
O mecanismo de fluência em compósitos reforçados por fibras depende de diferentes fatores como, por exemplo, o comportamento da matriz à fluência, o comportamento elástico e de fratura das fibras, a geometria e alinhamento destas e as propriedades interfásicas da matriz/fibra. Mecanismos como a transferência de carga entre a matriz e a fibra, o aumento da densidade de descolamento à volta da fibra e as tensões residuais resultantes das diferenças dos coeficientes de expansão térmica da fibra e matriz, têm de ser considerados simultaneamente [21].

Na literatura, existem estudos do comportamento de fluência das resinas de epóxi e o efeito da temperatura na viscoelasticidade do material [22]. A Figura 2.6 mostra que a 40°C (representado pela curva amarela) a resina tem uma primeira fase de fluência relevante e uma taxa de deformação significativamente maior que a resina testada a 35°C, 30°C e 25°C, o que pode estar relacionado com a aproximação da temperatura de transição vítrea.



**Figura 2.6.** Curvas de fluência para uma resina epoxídica a 40°C, 35°C, 30°C e 25°C [22].

Por exemplo, os compósitos reforçados por madeira são extremamente limitados devido à sua vulnerabilidade aos fenómenos de fluência. Verifica-se que o aumento da temperatura provoca maior deformação nos ensaios de fluência [23] conforme ilustra a Figura 2.7.



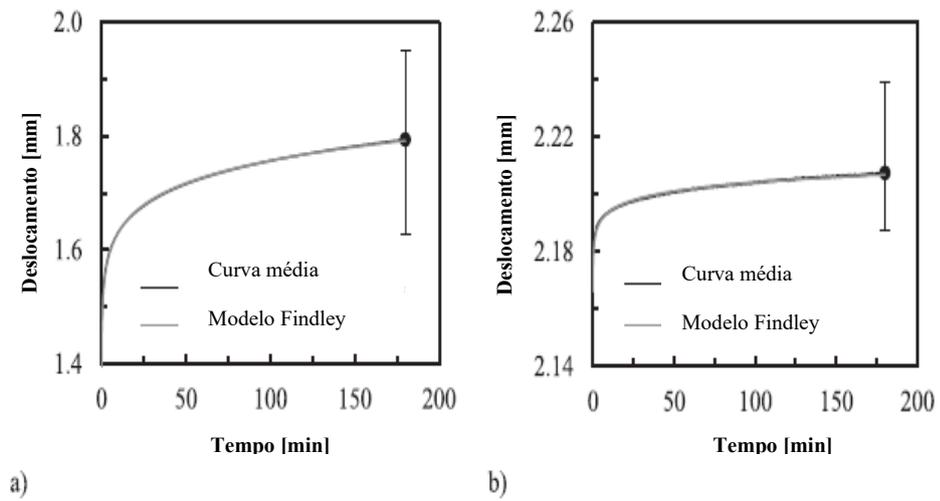
**Figura 2.7.** Fluência em compósitos WPC a várias temperaturas [23].

Foi demonstrado que os materiais de matriz epóxi reforçados por fibras de carbono são resistentes à rotura por fluência à temperatura ambiente e que as curvas de fluência para 65% e 77% da tensão de rotura são bastante similares [24]. Os compósitos GFRP também foram sujeitos a estudos sobre o efeito da água no fenómeno de fluência, tendo sido mostrado que a deformação atinge o seu valor máximo após 24 horas da imersão e que para tempos de imersão elevados, a deterioração do material devido à absorção de água tem um efeito relevante no comportamento de fluência do GFRP [25].

Assim como na relaxação de tensões, a literatura também apresenta modelos de previsão do comportamento viscoelástico para a fluência. Um dos modelos existentes é o modelo de Findley, o qual é dado pela equação 2.4.

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + At^n, \quad (2.4)$$

em que  $\varepsilon(t)$  é a deformação devido à fluência no instante  $t$ ,  $\varepsilon_0$  é a deformação elástica instantâneo,  $A$  a amplitude de fluência transiente (dependente do tempo) e  $n$  é uma constante independente da tensão e normalmente abaixo da unidade. A Figura 2.8 ilustra um exemplo da precisão deste modelo comparativamente aos resultados obtidos experimentalmente.



**Figura 2.8.** Comparação entre a curva experimental e a previsão pelo modelo de Findley para: a) Laminados de Kevlar e uma tensão de flexão de 150 MPa; b) Laminados de carbono e uma tensão de flexão de 400 MPa [20].

### **3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

Neste capítulo apresenta-se o material que foi estudado, assim como o seu modo de fabrico, geometria dos provetes utilizados durante os ensaios e respetiva metodologia.

#### **3.1. Material**

O material utilizado no presente estudo, como já foi referido, trata-se de um compósito de matriz epoxídica reforçada com fibras de vidro.

Inicialmente foram produzidas manualmente placas com dimensões de  $330 \times 330 \times 2,3 \text{ mm}^3$ , tendo sido, para tal, sobrepostas camadas alternadas de uma mistura resina + endurecedor (Biresin<sup>®</sup> CR122+ Biresin<sup>®</sup> CH122-3, ambos fornecidos pela Sika), previamente misturados numa proporção de 100:30 g em peso, e fibras de vidro em forma de tecido bidirecional 1195P (195 g/m<sup>2</sup>). Para a espessura indicada foram utilizadas 12 camadas de tecido de vidro e entre camadas existiu o cuidado de colocar a mesma quantidade de resina + endurecedor. Posteriormente, este sistema foi colocado num saco de vácuo e sujeito a uma força de 2,5 kN aplicada por uma prensa, durante 12 horas, com o objetivo de manter uma fração volumétrica e espessura constante. Por forma a eliminar eventuais bolhas de ar existentes no material, o saco de vácuo foi ligado a uma bomba de vácuo durante as primeiras 4 horas. Finalmente, foi realizada uma pós-cura num forno a uma temperatura de 60°C durante 8 horas, como sugerido na ficha técnica do fabricante.

Na Tabela 3.1 encontra-se as propriedades mecânicas da resina Biresin<sup>®</sup> CR122 com o endurecedor Biresin<sup>®</sup> CH122-3, conforme disponibilizado pelo fornecedor.

Tabela 3.1. Propriedades da resina de epóxico

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

### 3.2. Geometria dos provetes de ensaio

A geometria dos provetes utilizados nos diversos ensaios é do tipo “osso de cão” e encontram-se de acordo com a norma ASTM D3039 relativa aos ensaios de tração para materiais compósitos.

Estes provetes, com as dimensões ilustradas na Figura 3.1, foram obtidos a partir das placas descritas anteriormente e com recurso ao corte por jato de água. Após o corte, foi utilizada uma lixa P240 para obter um acabamento mais perfeito e uma secção constante, não ocorrendo arrancamento de fibras.

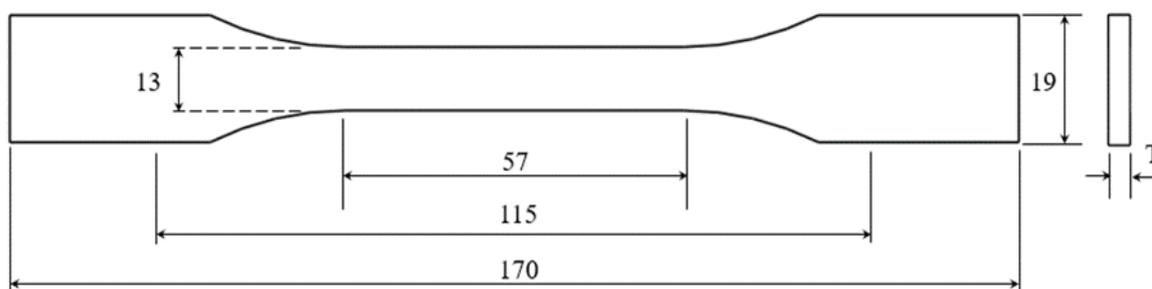


Figura 3.1. Geometria e dimensões dos provetes utilizados nos ensaios.

### 3.3. Metodologia de ensaio

Todos os ensaios foram realizados no DEM da FCTUC, com o auxílio da máquina SHIMADZU modelo Autograph AGS-X, Figura 3.2, equipada com uma célula de carga de 100 kN e ligada a um computador onde se encontra instalado o software TRAPEZIUM X que permite, deste modo, obter diretamente os valores recolhidos durante o ensaio.

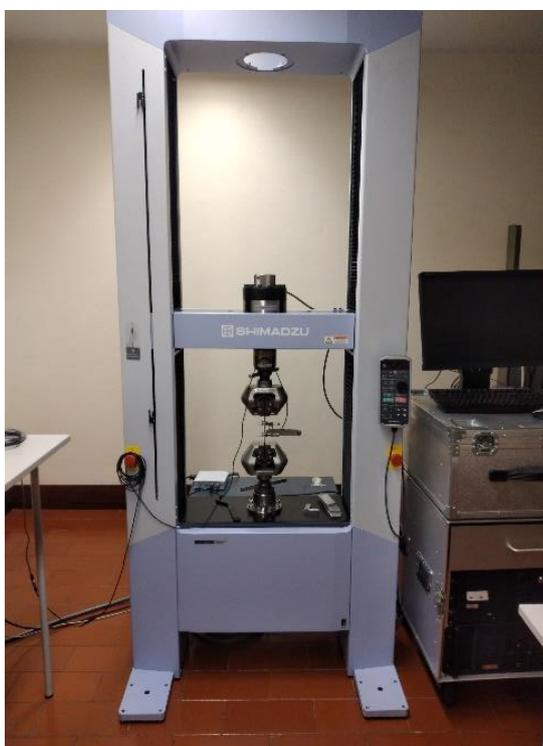


Figura 3.2. Máquina de Tração SHIMADZU Modelo Autograph AGS-X.

Os ensaios de tração foram realizados com o auxílio de um extensómetro mecânico para avaliar apenas o comportamento do material dentro do campo de medição do extensómetro (50 mm) e, assim, eliminar diversos erros como, por exemplo, possíveis escorregamentos. Todos os ensaios decorreram à temperatura ambiente, com uma velocidade de avanço do travessão de 5 mm/min e, de acordo com a norma, foram utilizados cinco provetes.

A tensão máxima de rotura do laminado foi obtida pela equação 3.1.

$$\sigma = \frac{P}{A_t}, \quad (3.1)$$

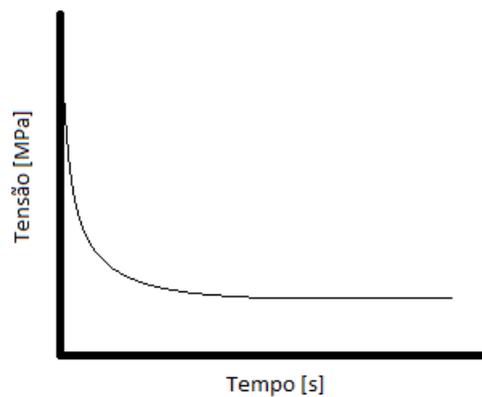
em que  $\sigma$  representa a tensão,  $P$  a carga e  $A_t$  a área transversal da zona útil do provete. Por sua vez, a deformação do provete é calculada pela equação 3.2.

$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0}, \quad (3.2)$$

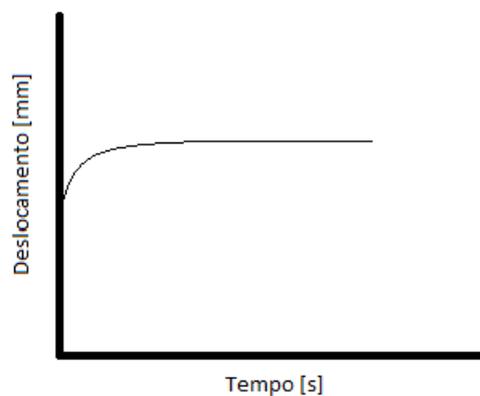
em que  $\varepsilon$  corresponde à deformação da amostra,  $l$  o comprimento da amostra e  $l_0$  o comprimento inicial da mesma. Deste modo é possível obter a curva tensão-deformação do laminado compósito, na qual é possível obter a tensão máxima de rotura do material.

Posteriormente foram realizados ensaios de relaxação de tensões e fluência. Enquanto nos primeiros aplica-se uma deformação constante (imposta por tensões semelhantes às usadas nos ensaios de fluência) e obtém-se a evolução da tensão ao longo do tempo, neste caso 3 horas, nos ensaios de fluência mantem-se constante a tensão e obtém-se a evolução da deformação com o tempo. Em ambos os casos, estabeleceram-se para os ensaios tensões na ordem dos 40% e 60% da tensão de rotura. Finalmente, com vista a estudar o efeito das pré-cargas na relaxação de tensões e na fluência, os provetes foram previamente sujeitos a pré-cargas de 20% e 40% sobre os valores anteriores (40% e 60% da tensão de rotura) e, seguidamente, sujeitos às mesmas condições de carregamento para comparabilidade. Para cada uma das condições ensaiadas foram usados 3 provetes e os resultados tratados em termos de valores médios. Ambos os ensaios decorreram à temperatura ambiente e foram monitorizados com recurso ao mesmo extensómetro.

De acordo com a Figura 3.3 e Figura 3.4, as curvas de relaxação de tensões são definidas graficamente pela variação da tensão ao longo do tempo de ensaio, sendo a deformação constante, enquanto as curvas de fluência são definidas graficamente pelo deslocamento em função do tempo, sendo a tensão constante.



**Figura 3.3.** Exemplo de uma curva de relaxação de tensões.



**Figura 3.4.** Exemplo de uma curva de fluência.

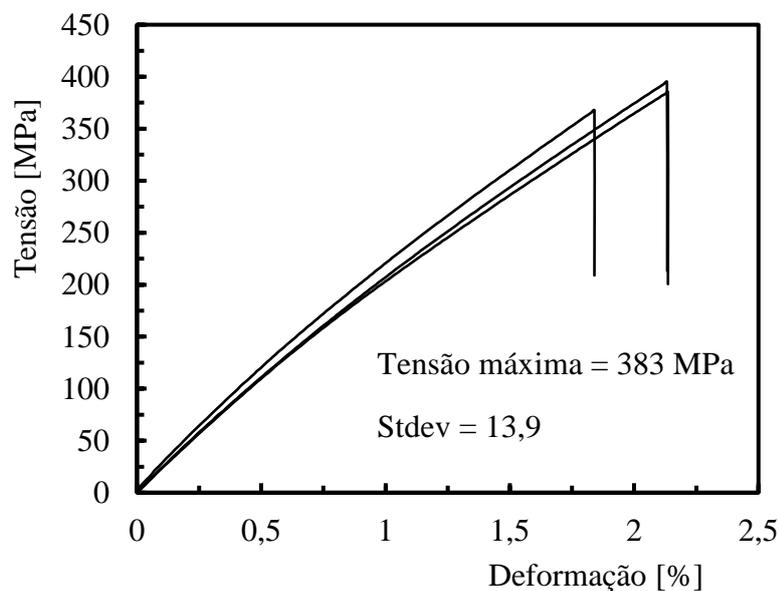


## 4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios experimentais realizados no âmbito do presente estudo, assim como a sua análise.

### 4.1. Caracterização estática

O primeiro passo deste trabalho consistiu na caracterização estática do material compósito. Para este fim, três provetes foram ensaiados à tração de acordo com o procedimento experimental descrito anteriormente e as curvas obtidas encontram-se ilustradas na Figura 4.1. Os valores da resistência à tração e respetiva média encontram-se apresentados na Tabela 4.1.



**Figura 4.1.** Curvas tensão - deformação para as três amostras ensaiadas.

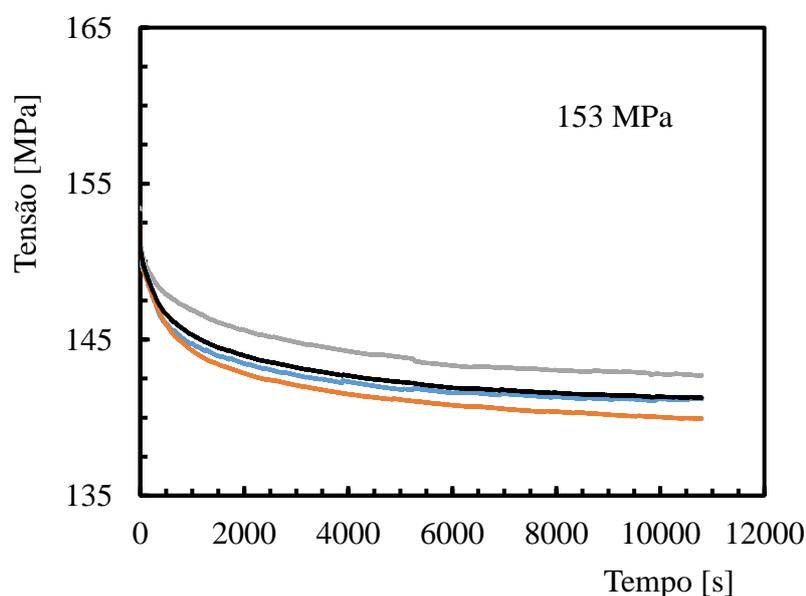
**Tabela 4.1.** Tensões de rotura e respetivo valor médio.

| Amostras  | Tensão de Rotura [MPa] |
|-----------|------------------------|
| Amostra 1 | 368                    |
| Amostra 2 | 395                    |
| Amostra 3 | 385                    |
| Média     | 383                    |

Verifica-se, então, que a resistência estática (tensão de rotura) média para o compósito em estudo é de 383 MPa com um desvio-padrão de 13,9 MPa.

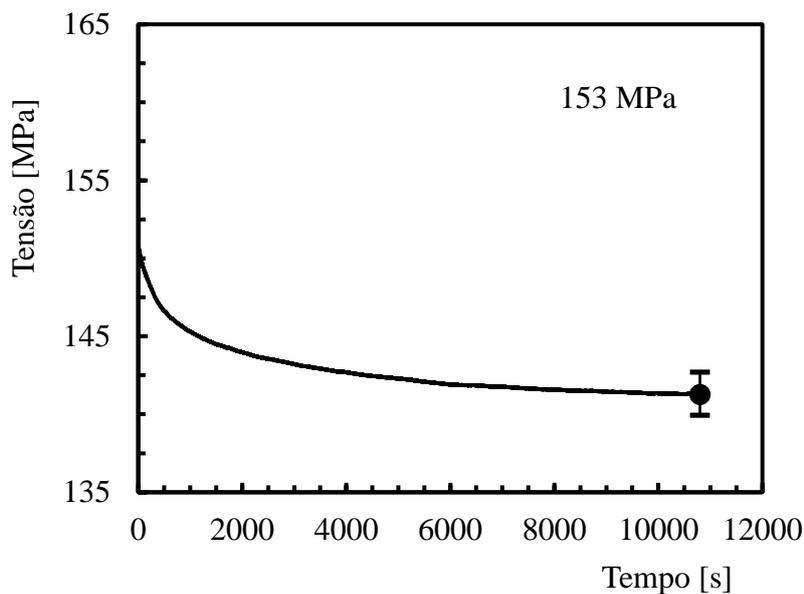
## 4.2. Estudo de Relaxação de Tensões

Como descrito no capítulo anterior, estabeleceram-se as tensões de 40% e 60% da tensão de rotura, com valores na ordem dos 153 MPa e 230 MPa, respetivamente, para a realização destes ensaios. Três amostras para cada uma das tensões foram ensaiadas durante 3 horas, com deformação constante, encontrando-se representadas na Figura 4.2 as curvas obtidas (com diferentes cores), assim como a média (representada a negro), para a tensão de 153 MPa. Curvas semelhantes foram obtidas para a tensão de 230 MPa, que devido à repetibilidade do seu andamento optou-se por não as apresentar neste documento. Estas curvas serão denominadas no futuro por curvas de controlo (provetes de controlo).

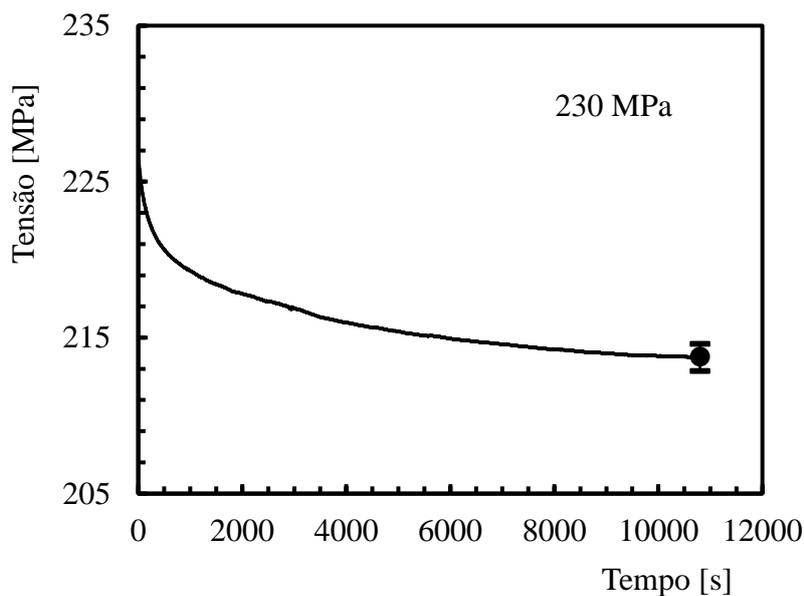


**Figura 4.2.** Curvas de relaxação de tensões para uma tensão inicial de 153 MPa.

Posteriormente o estudo foi efetuado em termos das curvas médias, Figura 4.3 e Figura 4.4 representativas das obtidas para as tensões de 153 MPa e 230 MPa, respetivamente. As bandas de dispersão apresentadas nas referidas figuras dizem respeito aos valores máximos e mínimos retirados da dispersão obtida dos 3 ensaios realizados.

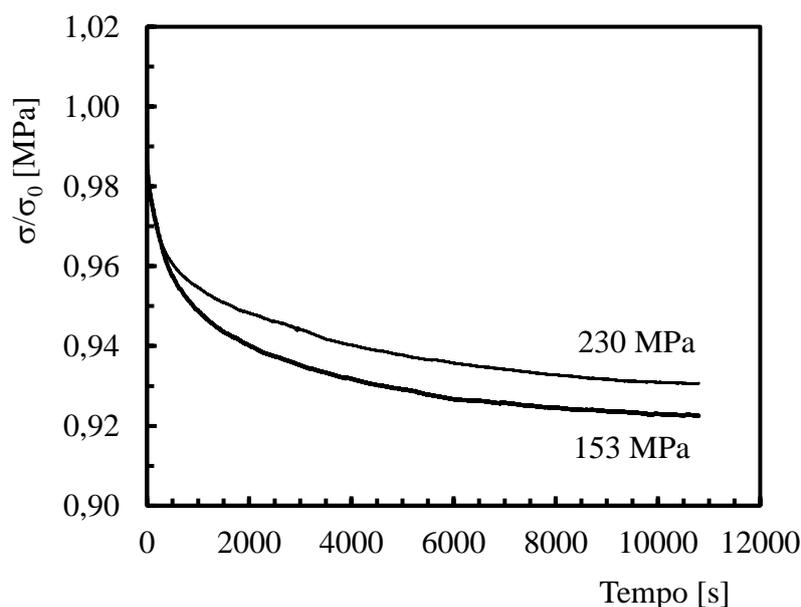


**Figura 4.3.** Curva média de relaxação de tensões para uma tensão inicial de 153 MPa.



**Figura 4.4.** Curva média de relaxação de tensões para uma tensão inicial de 230 MPa.

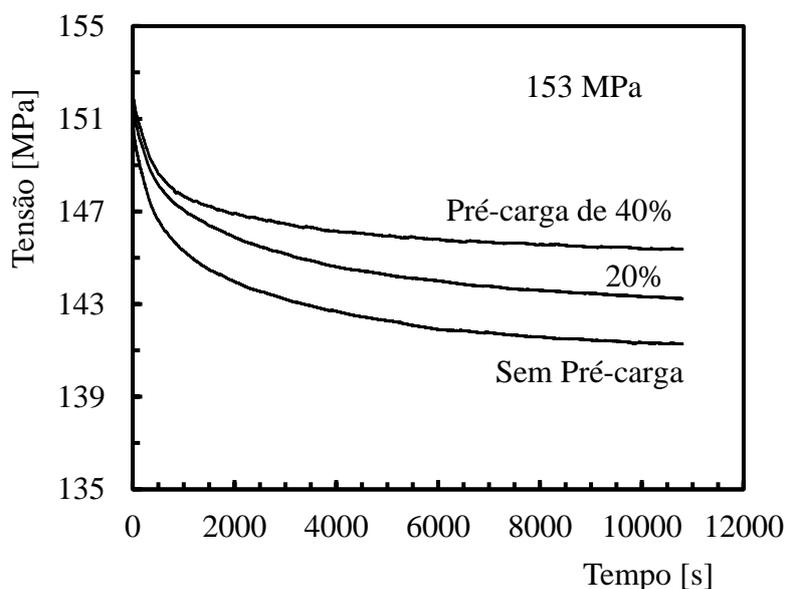
Com vista a avaliar a sensibilidade deste material, a Figura 4.5 compara as curvas de relaxação de tensões para as tensões de 153 MPa e 230 MPa. Para este efeito as curvas foram adimensionalizadas, em que  $\sigma$  é a tensão em cada instante do tempo e  $\sigma_0$  a tensão inicial do ensaio (153 MPa e/ou 230 MPa).



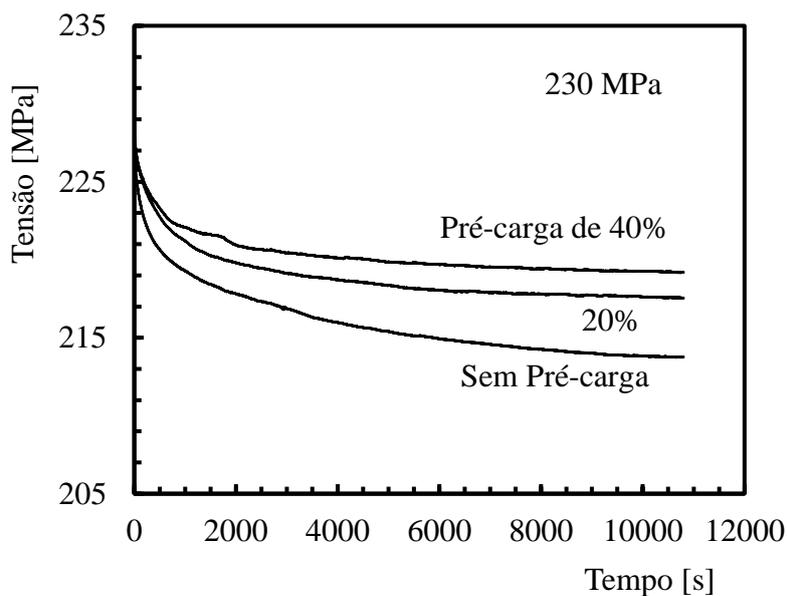
**Figura 4.5.** Comparação entre as duas curvas de relaxação.

A partir deste gráfico é possível retirar algumas conclusões para os provetes de controlo. No que diz respeito às amostras ensaiadas com uma tensão inicial de 153 MPa, 40% da tensão máxima de rotura, verificou-se que após 3 horas a tensão final é de aproximadamente 140 MPa, o que significa que ocorreu uma redução na ordem dos 8% face à tensão inicial imposta. Por outro lado, relativamente aos provetes com uma tensão inicial de 230 MPa, 60% da tensão máxima de rotura, estes apresentam uma tensão na ordem dos 212 MPa após as 3 horas, o que significa uma redução de 7% face à tensão inicial. É possível concluir que os provetes com 40% da tensão de rotura sofrem maior relaxação que os provetes de controlo com 60%. A diferença entre as tensões finais após 3 horas de ensaio para as duas condições ensaiadas é de apenas 1%.

No estudo seguinte foram introduzidas, em novos provetes, pré-cargas de 20% e 40% sobre os valores estudados para os provetes de controlo (153 MPa e 230 MPa) com o objetivo de estudar o efeito do pré-carregamento na relaxação de tensões. Os resultados encontram-se ilustrados na Figura 4.6 e Figura 4.7 e resumidos na Tabela 4.2.



**Figura 4.6.** Curvas de relaxação com e sem pré-cargas para uma tensão inicial de 153 MPa.



**Figura 4.7.** Curvas de relaxação com e sem pré-cargas para uma tensão inicial de 230 MPa.

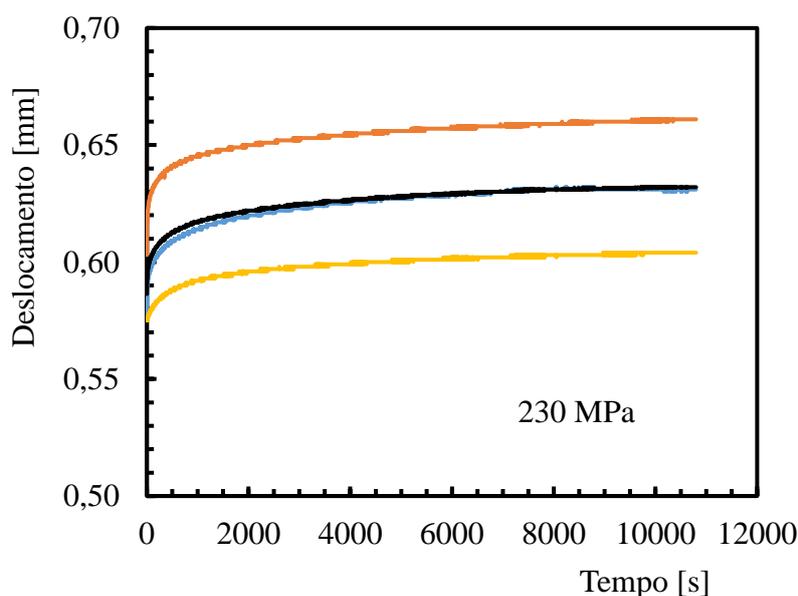
**Tabela 4.2.** Tensão Final e Redução em Percentagem dos Provetes Ensaçados.

| Provetes           | Tensão após 3 horas [MPa] | Redução de Tensão [%] |
|--------------------|---------------------------|-----------------------|
| Controlo [153 MPa] | 140                       | 8                     |
| 20% [153 MPa]      | 143                       | 6                     |
| 40% [153 MPa]      | 145                       | 5                     |
| Controlo [230 MPa] | 212                       | 7                     |
| 20% [230 MPa]      | 217                       | 6                     |
| 40% [230 MPa]      | 219                       | 5                     |

É possível verificar que os provetes sujeitos a pré-cargas de 20% e 40%, para as duas condições ensaiadas, têm uma redução relativa à tensão inicial de 6% e 5%, respetivamente. A partir dos gráficos apresentados anteriormente também é possível analisar que conforme se aumenta o valor de pré-carga, menor é a relaxação de tensões do compósito. Após as três horas, verifica-se uma redução de 2% entre o provete de controlo e o provete com 20% de pré-carga e apenas 1% entre o provete de 20% e 40% de pré-carga, considerando as amostras com tensão inicial de 153 MPa. Já para as amostras com 230 MPa de tensão inicial, a redução foi apenas de 1% entre os provetes de controlo e os provetes com 20% de pré-carga e de igual valor (1%) entre os provetes ensaiados com 20% e 40% de pré-carga. Acresce ainda o facto da diferença da relaxação de tensões entre os provetes de controlo e os provetes com pré-cargas ser visível logo nos primeiros 30 minutos de ensaio.

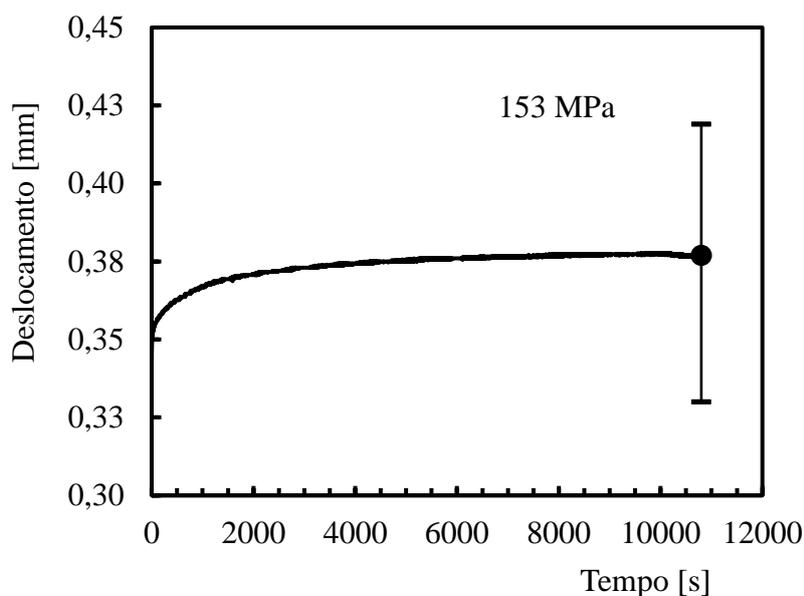
### 4.3. Estudo de Fluência

A metodologia utilizada nos ensaios de fluência é muito semelhante à dos ensaios de relaxação de tensões, mas a principal diferença é que os ensaios decorrem a tensão constante e, neste caso, é recolhido o deslocamento em função do tempo. A Figura 4.8 ilustra três curvas obtidas para uma tensão de 230 MPa, mas elas também são ilustrativas das obtidas nos ensaios realizados a 153 MPa. Na referida figura também se encontra representada a curva média (evidenciada a negro).

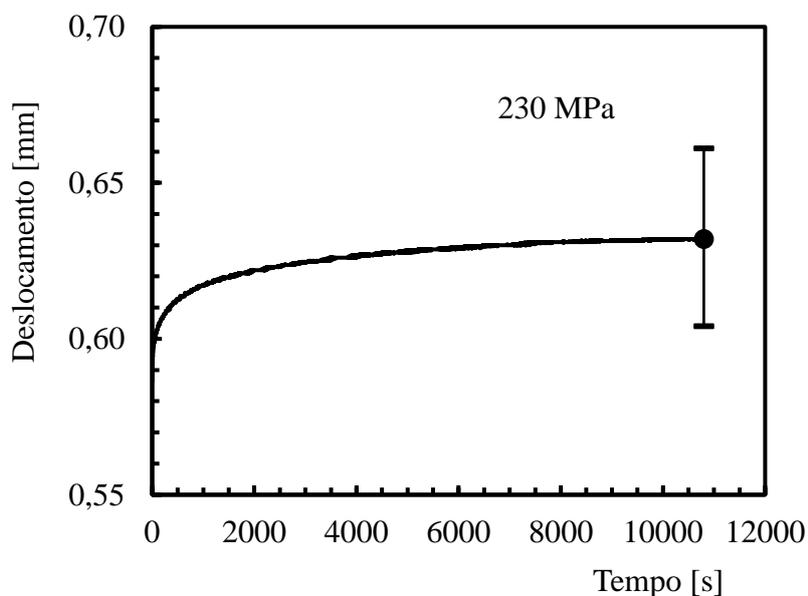


**Figura 4.8.** Curvas de fluência para 3 provetes de controlo para uma tensão de 230 MPa.

De forma semelhante ao que foi feito para as curvas de relaxação de tensões, a Figura 4.9 e Figura 4.10 apresentam as curvas médias de fluência para as tensões de 40% e 60% da tensão de rotura, respetivamente, representando as bandas, mais uma vez, o valor máximo e mínimo obtido para cada serie de ensaios.



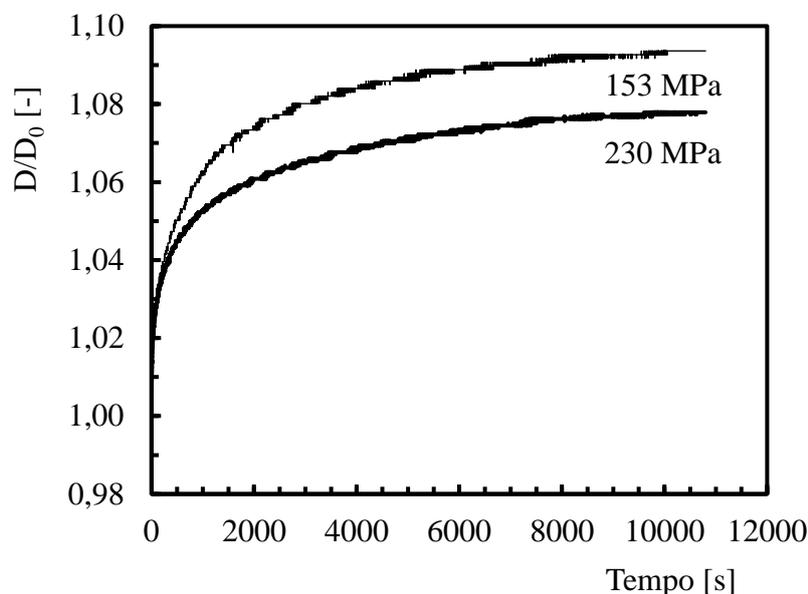
**Figura 4.9.** Curva média de fluência para uma tensão de 153 MPa.



**Figura 4.10.** Curva média de fluência para uma tensão de 230 MPa.

Finalmente a Figura 4.11 compara as curvas médias obtidas para cada tensão em estudo, no entanto, com vista a evidenciar a sensibilidade à fluência deste material, as curvas

foram adimensionalizadas pelo valor inicial de deformação. Este valor foi definido como a deformação elástica instantânea obtida aquando da aplicação da tensão.

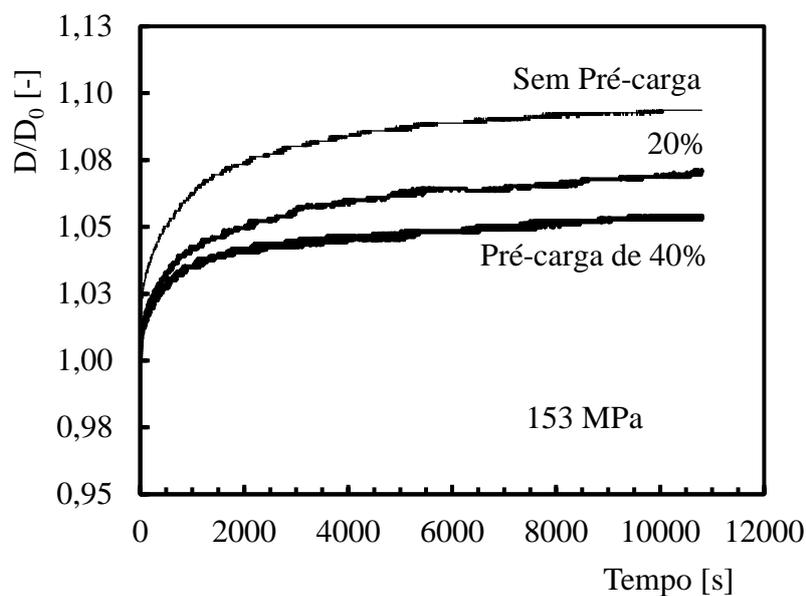


**Figura 4.11.** Comparação das curvas de fluência para as diferentes tensões.

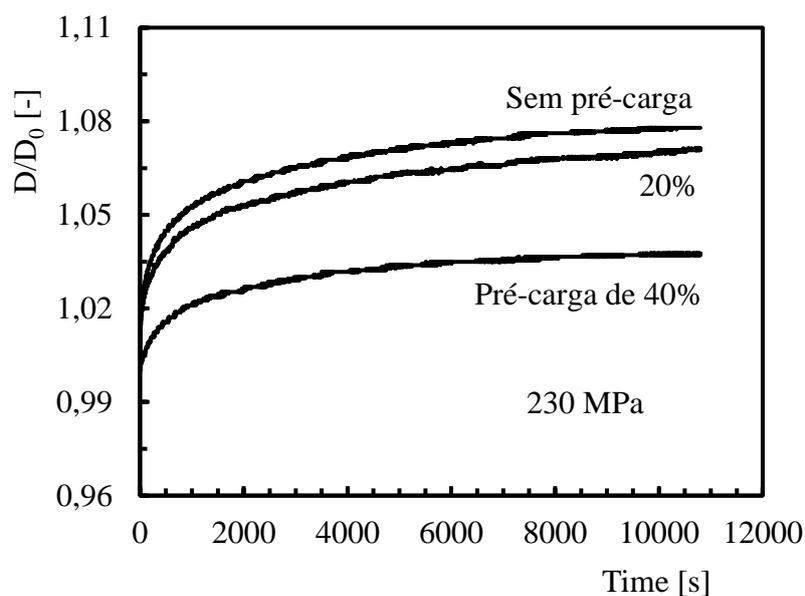
Das referidas figuras é possível verificar que para uma tensão de 153 MPa o deslocamento médio é de aproximadamente 0,38 mm, enquanto para a tensão de 230 MPa o deslocamento médio é aproximadamente 0,63 mm após três horas de ensaio.

No que diz respeito ao gráfico onde se faz a comparação das curvas de fluência, onde  $D$  representa o deslocamento em qualquer instante do tempo e  $D_0$  o deslocamento inicial aquando da aplicação da tensão, observa-se que para a tensão de 153 MPa ocorre maior fluência do que para 230 MPa. Por exemplo, comparativamente ao deslocamento inicial, os provetes ensaiados com 40% da tensão de rotura tiveram um aumento de aproximadamente 9%, enquanto os provetes com 60% tiveram um aumento na ordem dos 7,5% após as três horas de ensaio. Isto evidencia uma diferença entre as duas tensões de 1,5%.

Relativamente aos provetes ensaiados com pré-cargas de 20% e 40% sobre o valor das tensões de controlo (40% e 60% da tensão máxima), as suas curvas médias de fluência foram comparadas e encontram-se ilustradas na Figura 4.12 e Figura 4.13.



**Figura 4.12.** Curvas de fluência com e sem pré-cargas para uma tensão de 153 MPa.



**Figura 4.13.** Curvas de fluência com e sem pré-cargas para uma tensão de 230 MPa.

Das referidas figuras é possível concluir que as pré-cargas têm influência nas curvas de fluência. Quanto maior a pré-carga, menor é a capacidade de o material fluir. A percentagem de deformação após 3 horas de encontra-se apresentada na Tabela 4.3.

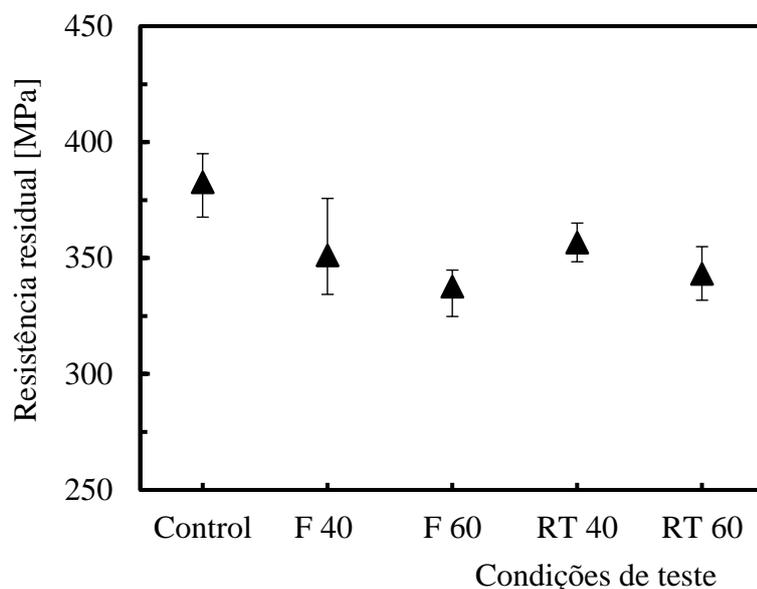
**Tabela 4.3.** Percentagem de deformação dos provetes ensaiados.

| <b>Provetes</b>    | <b>Deformação após 3 horas [%]</b> |
|--------------------|------------------------------------|
| Controlo [153 MPa] | 9                                  |
| 20% [153 MPa]      | 7                                  |
| 40% [153 MPa]      | 5                                  |
| Controlo [230 MPa] | 7,5                                |
| 20% [230 MPa]      | 7                                  |
| 40% [230 MPa]      | 4                                  |

É possível observar que para os provetes com 40% da tensão de rotura, quando se aplica uma pré-carga de 20%, a deformação após três horas de ensaio é de 2%. No que diz respeito aos provetes com 60% da tensão de rotura, enquanto uma pré-carga de 20% não apresenta uma deformação muito significativa face ao do observado nos provetes de controlo, uma pré-carga de 40% já mostra uma diferença muito significativa. Também é possível verificar que os provetes de controlo ensaiados com uma tensão de 153 MPa são os que sofrem maior fluência, ainda que os submetidos a pré-cargas de 40% sejam os menos afetados. Outra conclusão possível de se retirar é que quanto mais perto se estiver da tensão de rotura do material compósito, menor será a fluência. Estes resultados demonstram que a fluência e a relaxação de tensões são afetadas pelas pré-cargas submetidos ao material.

#### **4.4. Resistência Residual**

A resistência residual é definida neste estudo como a resistência à tração que um provete apresenta após ter sido submetido aos ensaios de fluência ou relaxação de tensões. Neste contexto, a Figura 4.14. Resistência residual para os provetes de controlo sem aplicação de pré-cargas. F e RT indicam que os resultados respeitam, respetivamente, aos ensaios de fluência e relaxação de tensões, enquanto os números indicam o valor da tensão, em percentagem, da tensão de rotura. Neste caso a denominação de controlo diz respeito aos resultados obtidos dos ensaios de tração (383 MPa) e, mais uma vez, as bandas de dispersão indicam os valores máximos e mínimos obtidos para cada serie de ensaios.



**Figura 4.14.** Resistência residual para os provetes de controlo sem aplicação de pré-cargas.

Analisando o gráfico, nota-se que os provetes que não foram sujeitos à fluência ou relaxação de tensões são os que apresentam maior resistência residual, com um valor médio de aproximadamente 383 MPa. Relativamente aos provetes que foram sujeitos a fluência e a relaxação de tensões verifica-se que, para o mesmo nível de deformação, apresentam valores de resistência residual muito semelhantes entre si. No entanto, as amostras após relaxação de tensões apresentam uma resistência residual ligeiramente maior (357 MPa para 40% e de 343 MPa para 60%) do que a observada nas amostras após fluência (351 MPa para 40% e de 338 MPa para 60%).

Uma análise semelhante também foi efetuada para as amostras sujeitas a pré-cargas, encontrando-se os resultados obtidos ilustrados na Figura 4.15 e Figura 4.16.

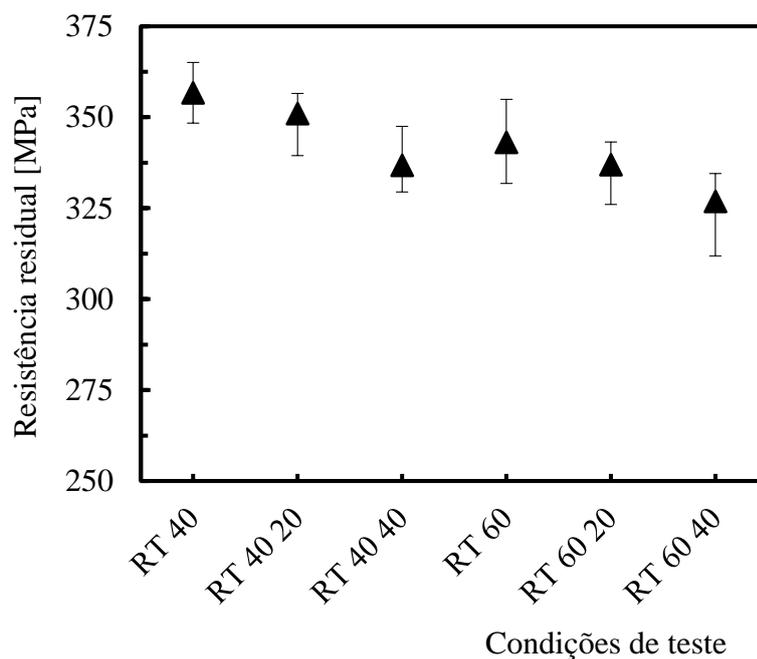


Figura 4.15. Resistência residual dos provetes sujeitos a relaxação de tensões.

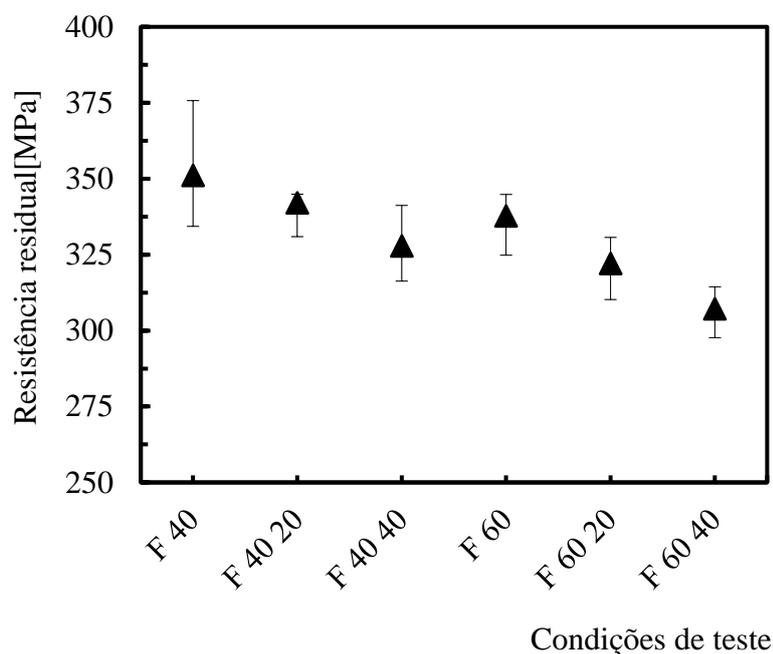


Figura 4.16. Resistência residual dos provetes sujeitos a fluência.

Com base nos dois gráficos apresentados, é possível verificar que as amostras submetidas a ensaios de relaxação de tensões apresentam maior resistência residual do que as amostras submetidas a ensaios de fluência para as mesmas condições de carregamento e pré-carregamento, embora a diferença não seja muito significativa.

Também se pode observar que a introdução de pré-cargas diminui a resistência residual do compósito após ter sido sujeito aos ensaios de fluência e relaxação de tensões. Por exemplo, as amostras com 60% da tensão de rotura ensaiadas em condições de fluência apresentam a maior redução de resistência residual quando submetidas a pré-cargas, comparativamente às amostras nas mesmas condições de carregamento em ensaios de relaxação de tensões, com uma diferença de aproximadamente 30 MPa entre os provetes sem carregamento prévio e os provetes com 40% de pré-carga, estes últimos tendo uma resistência residual de aproximadamente 307 MPa.

Em todos os provetes submetidos a pré-cargas, em ensaios de fluência ou relaxação de tensões, as amostras que apresentaram maior resistência residual foram os provetes ensaiados em relaxação de tensões, com 40% da tensão de rotura e 20% de pré-carregamento, apresentando um valor aproximado de 351 MPa.

---

## 5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo serão apresentadas as principais conclusões retiradas deste estudo, sendo posteriormente sugeridas recomendações para trabalhos que possam vir a ser efetuados no futuro.

### 5.1. Conclusões

A investigação efetuada no âmbito da presente dissertação teve como principal objetivo estudar o efeito da introdução de pré-cargas no comportamento viscoelástico de um material compósito de matriz polimérica reforçado por fibras de vidro, nomeadamente ao nível da relaxação de tensões e fluência. Por fim, foi efetuada uma análise a nível de resistência residual estática das amostras ensaiadas. Após a análise dos resultados obtidos, foi possível retirar as seguintes conclusões:

- Os provetes ensaiados para 40% da tensão de rotura apresentam maiores valores de relaxação de tensões do que os provetes ensaiados com uma deformação correspondente a 60% da tensão de rotura, no entanto, a diferença dos resultados obtidos após 3 horas foi apenas de 1%.
- A introdução de pré-cargas diminui a relaxação de tensões, efeito que se mostrou muito dependente da magnitude destas pré-cargas.
- A diferença observada ao nível da relaxação de tensões entre os provetes de controlo e os sujeitos a pré-cargas é visível logo nos primeiros 30 minutos de ensaio.
- Para os provetes de controlo, a tensão de 153 MPa conduz a uma maior fluência do que a tensão de 230 MPa, cuja diferença após 3 horas de ensaio é de apenas 1,5%.
- Nos ensaios de fluência, as pré-cargas alteram o comportamento à fluência do compósito. Quanto maior o valor da pré-carga, menor é a capacidade de o material sofrer fluência.

- 
- Os provetes que não foram sujeitos a fluência ou relaxação de tensões são os que apresentam maior resistência residual. Por sua vez, a introdução de pré-cargas mostra ter efeito nestes dois comportamentos.
  - Para as mesmas condições de teste, as amostras após terem sido sujeitas a relaxação de tensões apresentam maior resistência residual do que as que foram sujeitas à fluência.

## 5.2. Recomendações para Trabalhos Futuros

A partir das conclusões retiradas deste estudo, é possível enumerar algumas propostas de trabalhos futuros, com vista a melhorar a compreensão sobre o material estudado e os seus possíveis campos de aplicação, sendo elas:

- Estudo do efeito de fadiga na relaxação de tensões e fluência de compósitos GFRP.
- Estudar o efeito da temperatura no comportamento viscoelástico do material compósito, bem como o efeito das pré-cargas.
- Elaborar estudos com recurso ao método dos elementos finitos com vista a modelar o efeito das pré-cargas no comportamento viscoelástico dos materiais compósitos.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, *Fundamentals of materials science and engineering : an integrated approach*. 2018.
- [2] B. Piyooosh, T., Pawan, S. & Manish, “An approach of composite materials in industrial machinery: Advantages, disadvantages and applications,” *Int. J. Res. Eng. Technol.*, vol. 2, no. 12, pp. 350–355, 2013.
- [3] M. M. Pas, C. Br, L. Luca, C. Br, and R. Dimitrov, “Aspects of composite materials evolution,” no. 2, pp. 55–60, 2019.
- [4] G. Brown, “The Use of Composites in Aircraft Construction | Words, By George!,” 2014. <https://vandaair.com/2014/04/14/the-use-of-composites-in-aircraft-construction> (accessed Oct. 30, 2021).
- [5] C. Elanchezhian, B. V. Ramnath, and J. Hemalatha, “Mechanical Behaviour of Glass and Carbon Fibre Reinforced Composites at Varying Strain Rates and Temperatures,” *Procedia Mater. Sci.*, vol. 6, no. Icmpec, pp. 1405–1418, 2014, doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.120.
- [6] N. Zimmermann and P. H. Wang, “A review of failure modes and fracture analysis of aircraft composite materials,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 115, no. June, p. 104692, 2020, doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104692.
- [7] P. M. Jelf and N. A. Fleck, “Compression Failure Mechanisms in Unidirectional Composites,” *J. Compos. Mater.*, vol. 26, no. 18, pp. 2706–2726, 1992, doi: 10.1177/002199839202601804.
- [8] M. R. Woodward and R. Stover, “Damage Tolerance,” *Composites*, pp. 295–301, Dec. 2001, doi: 10.31399/ASM.HB.V21.A0003386.
- [9] J. R. Schaff, “Fatigue and Life Prediction,” *Composites*, pp. 252–258, Dec. 2001, doi: 10.31399/ASM.HB.V21.A0003382.
- [10] S. Soni, R. S. Rana, B. Singh, and S. Rana, “Synthesis and Characterization of Epoxy based Hybrid Composite Reinforced with Glass Fiber and Milled Carbon,” *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 2, pp. 4050–4058, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2017.11.666.
- [11] J. Wiley, *Fundamentals of Materials Science and Engineering An Interactive*. .

- 
- [12] T. P. Sathishkumar, S. Satheeshkumar, and J. Naveen, “Glass fiber-reinforced polymer composites - A review,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 33, no. 13, pp. 1258–1275, 2014, doi: 10.1177/0731684414530790.
- [13] Y. Weitsman, “Residual Thermal Stresses Due to Cool-Down of Epoxy-Resin Composites,” vol. 46, no. September 1979, pp. 563–567, 1979.
- [14] M. Eftekhari and A. Fatemi, “On the strengthening effect of increasing cycling frequency on fatigue behavior of some polymers and their composites: Experiments and modeling,” *Int. J. Fatigue*, vol. 87, pp. 153–166, 2016, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2016.01.014.
- [15] R. J. Guedes, “Previsão da Vida Útil de Materiais Compósitos de Matriz Polimérica,” 1997.
- [16] S. K. N. Kutty and G. B. Nando, “Short kevlar fiber–thermoplastic polyurethane composite,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 43, no. 10, pp. 1913–1923, 1991, doi: 10.1002/app.1991.070431016.
- [17] N. R. George, J.;Sreekala, M. S.;Thomas, S.;Bhagawan, S. S.;Neelakantan, “Stress Relaxation Behavior of Short Pineapple Fiber Reinforced Polyethylene Composites,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, pp. 651–672, 1998.
- [18] P. N. B. dos Reis, A. M. Amaro, and M. A. Neto, “Effect of fibre orientation and hostile solutions on stress relaxation of glass/polyamide composites,” *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 1, 2020, doi: 10.3390/polym12010020.
- [19] P. N. B. Reis, M. A. Neto, and A. M. Amaro, “Effect of hostile solutions on stress relaxation of carbon/epoxy composites,” *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 165, pp. 60–67, 2019, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2019.04.026.
- [20] P. N. B. Reis, M. P. Silva, P. Santos, J. M. Parente, and A. Bezazi, “Viscoelastic behaviour of composites with epoxy matrix filled by cork powder,” *Compos. Struct.*, vol. 234, no. October 2019, p. 111669, 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111669.
- [21] G. C. Papanicolaou and S. P. Zaoutsos, *Viscoelastic constitutive modeling of creep and stress relaxation in polymers and polymer matrix composites*. Woodhead Publishing Limited, 2010.
- [22] M. Perrella, V. P. Berardi, G. Cricri, and R. Esposito, “Experimental evaluation of the long-term creep deformations of epoxy resin,” *Procedia Struct. Integr.*, vol. 24, no. 2019, pp. 601–611, 2019, doi: 10.1016/j.prostr.2020.02.053.

- 
- [23] F. C. Chang, F. Lam, and J. F. Kadla, “The effect of temperature on creep behavior of wood-plastic composites,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 33, no. 9, pp. 883–892, 2014, doi: 10.1177/0731684414523691.
- [24] W. K. Goertzen and M. R. Kessler, “Creep behavior of carbon fiber/epoxy matrix composites,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 421, no. 1–2, pp. 217–225, 2006, doi: 10.1016/j.msea.2006.01.063.
- [25] G. C. Papanicolaou, A. G. Xepapadaki, and D. S. Zarouchas, “Effect of water uptake on creep behaviour of glass-epoxy composites,” *Plast. Rubber Compos.*, vol. 38, no. 2–4, pp. 72–79, 2009, doi: 10.1179/174328909X387874.