



UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

FACULDADE  
DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA

## **Efeito das descargas elétricas no comportamento viscoelástico de CFRP**

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

### **Effect of the electric current on the viscoelastic behavior of CFRP**

**Autor**

**João Alfredo Martins Saraiva**

**Orientadores**

**Professora Doutora Ana Paula Bettencourt Martins Amaro**

**Professor Doutor Mário João Simões Ferreira dos Santos**

**Júri**

**Presidente** Professora Doutora Ana Paula da Fonseca Piedade  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Orientador** Professor Doutor Mário João Simões Ferreira dos Santos  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Vogais** Professor Doutor Paulo Nobre Balbis dos Reis  
Professor Auxiliar da Universidade da Beira interior

**Coimbra, setembro, 2018**



Ao avô Alfredo.



## **Agradecimentos**

Esta dissertação foi realizada com bastante dedicação e empenho, proporcionados por algumas pessoas, às quais gostaria de prestar o meu reconhecimento e gratidão.

À Professora Doutora Ana Paula Amaro e ao Professor Doutor Mário João Santos, por toda a disponibilidade, colaboração, aconselhamento e motivação, ao longo deste período de trabalho.

A todos os professores que verdadeiramente se interessam pelos alunos, e que sempre estiveram disponíveis.

Aos meus colegas de trabalho do Laboratório de Mecânica Estrutural, pela amizade, apoio e convívio ao longo destes últimos meses.

A toda a minha família, pela confiança e apoio, desde sempre.

A todos os meus amigos, de infância, colegas de casa, amizades que este percurso académico me deu, e à minha namorada, que muito me desorientaram nesta vida académica e não só, mas que sempre estiveram lá para me orientar e apoiar.

Aos meus pais, a quem agradeço pela oportunidade, condições e apoio, que sempre me proporcionaram

A todos eles, um grande bem-haja.



## Resumo

O uso de materiais compósitos tem tido um aumento crescente, devido às suas propriedades mecânicas melhoradas pela união de dois materiais distintos, bastante requisitadas nas diversas áreas de engenharia. No entanto, estes materiais podem estar sujeitos a degradações e solicitações, que afetam a sua integridade estrutural.

A presente dissertação apresenta como principal objetivo o estudo do comportamento viscoelástico de laminados de carbono/epóxi, após terem sido sujeitos a descargas elétricas, de diferentes intensidades durante diferentes tempos de exposição.

As descargas elétricas, nas intensidades de corrente de 1 A e 3 A, promovem a degradação do material, que irá comprometer as propriedades iniciais dos laminados de carbono/epóxi. Recorrendo a ensaios de flexão em três pontos (3PB) e relaxação de tensões (SR), foi estudado o comportamento viscoelástico deste compósito. Na relaxação de tensões ir-se-á usar o modelo KWW (Kohlrausch-Williams-Watts), para modelar o comportamento de relaxação de tensões. Foi feita uma análise às amostras através de uma técnica de cariz não-destrutivo, C-Scan ultrassónico, antes e após solicitação, bem como visualizadas com microscópico ótico, para entender a degradação provocada.

Os resultados são apresentados através de gráficos que descrevem o tipo de solicitação efetuada, em que são sempre comparadas as amostras degradadas com amostras controlo, isto é, amostras não degradadas. Através dos ensaios de 3PB, foi definida a tensão inicial a usar nos ensaios de SR, em função do tamanho das amostras.

Foi possível confirmar que após as descargas elétricas, existe uma degradação, que depende da intensidade da corrente, do tempo de exposição e do tamanho da amostra, a qual tem influência na integridade estrutural do compósito. Verificou-se uma diminuição da tensão de rotura à flexão, para aumentos de tempo de exposição e intensidade de corrente. A relaxação de tensões foi igualmente afetada. O efeito do aumento da intensidade de corrente e do tempo provocou uma maior relaxação de tensões.

**Palavras-chave:** Comportamento viscoelástico, C-Scan, Descargas elétricas, Laminados carbono/epóxi, Relaxação de tensões.



## Abstract

The use of composite materials has been increased, due to its improved mechanical properties by the union of two different materials, quite required in the different fields of engineering. However, these materials may be subject to degradations and stresses, which can affect the structural integrity of these.

The present dissertation presents as principal goal to study the viscoelastic behavior of carbon/epoxy laminates, after submitted to electric discharges, of different intensities and different exposure times.

Electrical discharges, with current intensity of 1 A and 3 A, promote material degradation, and this damage will compromise the initial properties of carbon/epoxy laminates. Using three-point bending (3PB) and stress relaxation (SR) tests, the viscoelastic behavior of this composite was studied. In stress relaxation, the KWW model (Kohlrausch-Williams-Watts) will be used as model for adjusting and predicting the results. Samples were analyzed through a non-destructive scanning technique, the ultrasonic C-Scan, before and after the tests, as well as visualized with optical microscopy, to understand the degradation provoked.

The results are presented in graphs that describe the type of request made, where degraded samples are always compared with non-degraded control samples. Through the 3PB tests, the initial stress to be used in the SR tests was determined as a function of sample size.

It was possible to confirm that after the electrical discharges a significant degradation was observed, which depends on the intensity of the current, the exposure time and the size of the degraded sample, which affected the structural integrity of the laminates. There was a decrease in bending rupture stress for increases in exposure time and current intensity. The stress relaxation was also affected. The effect of increasing current intensity and time caused a greater stress relaxation.

**Keywords** Carbon/epoxy laminates, C-Scan, Electric discharges, Stress relaxation, Viscoelastic behaviour.



---

## Índice

Índice de Figuras .....	ix
Índice de Tabelas .....	xi
Simbologia e Siglas .....	xiii
Simbologia.....	xiii
Siglas .....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento .....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Organização .....	2
2. ESTADO DA ARTE .....	3
2.1. Materiais Compósitos .....	3
2.1.1. Matriz e Reforço .....	4
2.1.2. Materiais Compósitos de Matriz Polimérica .....	6
2.1.3. Materiais Compósitos Reforçados com Fibras .....	7
2.2. Degradação de Materiais Compósitos .....	9
2.3. Comportamento Elétrico .....	10
2.4. Comportamento Viscoelástico .....	11
2.5. Flexão em Três Pontos e Relaxação de Tensões .....	12
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	15
3.1. Materiais .....	15
3.2. Degradação Elétrica .....	16
3.3. C-Scan.....	17
3.4. Ensaaios .....	18
3.5. Procedimento .....	19
4. RESULTADOS .....	21
4.1. Flexão em Três Pontos (3PB) .....	21
4.2. Relaxação de Tensões (SR) .....	25
4.2.1. Efeito da Intensidade de Corrente e do Tempo .....	28
4.2.2. Efeito do Tamanho .....	30
4.3. C-Scan.....	32
4.4. Modelo KWW.....	34
5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS .....	39
5.1. Conclusões .....	39
5.2. Propostas para trabalhos futuros .....	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	41



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Tipos de Materiais Compósitos [3].	4
Figura 2.2. Tipos de Reforços [6].	5
Figura 2.3. Natureza dos Constituintes dos Materiais Compósitos [7].	5
Figura 2.4. Compósitos de matriz polimérica e reforços [3].	6
Figura 2.5. Representação das Orientações das Fibras [4].	8
Figura 3.1. Amostras de 70 mm e 100 mm.	16
Figura 3.2. Montagem para a realização da degradação elétrica.	16
Figura 3.3. Esquema do sistema de descarga elétrica [15].	16
Figura 3.4. Setup C-Scan.	17
Figura 3.5. Shimadzu AG-10.	18
Figura 3.6. Ensaios: (a)- 3PB; (b)- SR.	19
Figura 4.1. 3PB provetes de controlo.	21
Figura 4.2. 3PB amostras de 100 mm degradadas com intensidade de corrente de 1 A.	22
Figura 4.3. 3PB amostras de 70 mm degradadas com intensidade de corrente de 3 A.	22
Figura 4.4. 3PB amostras de 100 mm degradadas com intensidade de corrente de 3 A.	23
Figura 4.5. Laminado carbono/epóxi sem degradação.	24
Figura 4.6. Amostra de controlo após 3PB.	24
Figura 4.7. Amostra degradada 4H-3A após 3PB.	25
Figura 4.8. Amostra degradada 2H-3A após 3PB.	25
Figura 4.9. SR amostras de 70 mm degradadas com intensidade de corrente de 1 A.	26
Figura 4.10. SR amostras de 70 mm degradadas com intensidade de corrente de 3 A.	26
Figura 4.11. SR amostras de 100 mm degradadas com intensidade de corrente de 3 A.	27
Figura 4.12. Efeito da intensidade de corrente para tempo de exposição de 1h.	29
Figura 4.13. Efeito do tempo de exposição para intensidade de 1 A.	29
Figura 4.14. Efeito do tempo de exposição para intensidade de 3 A.	30
Figura 4.15. Efeito do tamanho da amostra no ensaio de SR.	31
Figura 4.16. Efeito do tamanho da amostra no ensaio de SR (%).	31
Figura 4.17. Amostra 1 de 70 mm antes de sujeita a descarga e escala C-Scan.	32
Figura 4.18. Amostra 1 de 70 mm após sujeita a descarga.	33

Figura 4.19. Amostra 2 de 70 mm antes de sujeita a descarga. ....	33
Figura 4.20. Amostra 2 de 70 mm após sujeita a descarga. ....	33
Figura 4.21. Amostra 1 de 100 mm após sujeita a descarga. ....	34
Figura 4.22. Amostra 2 de 100 mm após sujeita a descarga. ....	34
Figura 4.23. Modelo KWW para CS. ....	35
Figura 4.24. Modelo KWW para 1H1A. ....	35
Figura 4.25. Modelo KWW para 2H1A. ....	35
Figura 4.26. Modelo KWW para 4H1A. ....	35
Figura 4.27. Modelo KWW para 1H3A. ....	36
Figura 4.28. Modelo KWW para 2H3A. ....	36
Figura 4.29. Modelo KWW para 4H3A. ....	36
Figura 4.30. Relação Polinomial para 1 A. ....	37
Figura 4.31. Relação Polinomial para 3 A. ....	38

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Vantagens e Desvantagens de Resinas [1]. .....	7
Tabela 2.2. Propriedades mecânicas básicas de fibras e outros materiais [1]. .....	9
Tabela 4.1. Tensão de Ruptura Média à Flexão. ....	23
Tabela 4.2. Relaxação de Tensões. ....	28
Tabela 4.3. Erro entre a Curva Teórica e a Experimental. ....	36
Tabela 4.4. Modelo KWW para 1 A. ....	36
Tabela 4.5. Modelo KWW para 3 A. ....	36



## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

b – Largura

h – Espessura

L – *Spam*

P – Força aplicada

$\sigma_R$  – Tensão de rotura à flexão

$\Delta\sigma$  – Variação de tensão

### Siglas

CFRP – *Carbon Fibre Reinforced Polymer*

CS – *Control Sample* (Provete de Controlo)

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

SR – *Stress Relaxation* (Relaxação de Tensões)



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento

A história dos materiais usados pelo homem marcou as diferentes Eras (do ferro, do bronze ...) tal como o progresso das civilizações. No que toca aos materiais compósitos, as origens destes remontam há milhares de anos quando se reforçavam paredes com palha para aumentar a integridade estrutural, e se construía carroças através da união de paus, ossos e chifres de animais. Hoje em dia, a evolução na área dos materiais, levou a que a classe dos materiais compósitos ofereça vantagens em relação a outras, graças à mistura de propriedades características dos materiais metálicos, cerâmicos e polímeros num só material. Estes, são cada vez mais utilizados nas diversas áreas de engenharia, como por exemplo na indústria aeronáutica, automóvel e naval. Como tal, também os estudos sobre os compósitos têm vindo a aumentar, quer para satisfazer a necessidade de encontrar as propriedades mecânicas desejadas para um certo tipo de aplicação, quer para entender o seu comportamento e desempenho em diferentes tipos de ambientes e de cargas.

É certo que a procura dos materiais compósitos se deve pelas suas boas características, tais como resistência e rigidez específica, mas apresentam também limitações, que são importantes conhecer. Danos provocados pelo ambiente em que são inseridos podem provocar degradações que levem à deterioração da integridade estrutural do material, tal como o dano induzido por cargas a que podem estar sujeitos, degradação essa que mesmo não sendo visível pode ser determinante no tempo de vida útil do compósito.

No presente estudo, abordam-se os compósitos de laminados carbono/epóxi, submetidos a degradação elétrica. Uma vez sujeitos a correntes ou descargas elétricas, fenómenos que podem ser considerados um dano “prévio”, que podem alterar a resposta destes materiais quando submetidos a esforços adicionais, pelo que se torna importante avaliar essa diminuição da resposta dos materiais compósitos.

## **1.2. Objetivos**

O principal objetivo deste estudo é avaliar o comportamento viscoelástico dos laminados carbono/epóxi, após serem submetidos a um ambiente hostil de descargas elétricas.

O material compósito irá ser submetido a uma corrente elétrica, ao longo de determinados intervalos de tempo, e com diversas intensidades de corrente. Posteriormente são submetidos a ensaios de flexão e de relaxação de tensões, de modo a avaliar o seu comportamento viscoelástico. Para tal, serão avaliadas diversas amostras, e no fim dos ensaios comparados os resultados para diferentes tempos de exposição, intensidades e tamanhos de amostras.

Será também feita uma análise à integridade estrutural das amostras degradadas, através de técnicas não destrutivas, neste caso pelo C-Scan com o fim de verificar a existência de defeitos, mesmo quando não visíveis. Através do uso de um microscópico serão observados os defeitos na superfície provocados pela passagem da corrente elétrica.

## **1.3. Organização**

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos, começando por este, a introdução, em que se apresentam os tópicos e objetivos a serem desenvolvidos ao longo deste estudo. De seguida, no segundo capítulo é feito um enquadramento teórico acerca dos materiais compósitos, e apresentados estudos e pesquisas já realizadas que estão diretamente relacionadas com os objetivos do presente estudo, acerca do material e ensaios. O terceiro capítulo consiste na descrição do método experimental, necessário à realização dos ensaios. No quarto capítulo são apresentados os resultados dos ensaios anteriormente descritos, e discutidas as variações ocorridas quer no material, quer nas propriedades destes. Por fim, o capítulo cinco, são retiradas as ilações desta dissertação, e indicadas as sugestões para futuros estudos.

## 2. ESTADO DA ARTE

Neste capítulo apresentam-se os conceitos base necessários, disponíveis na bibliografia, para a uma melhor compreensão dos materiais compósitos, da sua constituição, modos de degradação, o seu comportamento viscoelástico e elétrico, e os ensaios experimentais a utilizar.

### 2.1. Materiais Compósitos

Os materiais compósitos resultam da combinação de dois ou mais materiais, em que um deles é a matriz e o(s) outro(s) reforço(s), com objetivo de complementar as suas propriedades mecânicas no compósito final [1].

A matriz é geralmente um material contínuo (fase contínua) que envolve a fase dispersa (o reforço). As propriedades do compósito dependem de diversos fatores, entre eles a geometria da fase dispersa e orientação, bem como da compatibilidade inter-facial dos constituintes da mistura, sendo por isso necessário que exista afinidade entre estes [2].

São produzidos de modo a que ofereçam propriedades mecânicas que em outros tipos de materiais não seriam possíveis, como por exemplo, elevada rigidez específica (rigidez/massa). Contudo, apresentam um custo elevado quando comparados com os materiais tradicionais. Ainda assim, as suas propriedades são relevantes, o que os torna cada vez mais procurados nas diversas áreas de engenharia. Proporcionam também elevada resistência específica (resistência/massa), bem como boa resistência à fadiga, estabilidade térmica, baixa condutibilidade e amortecimento da vibração. No entanto, são muito sensíveis aos seus processos de produção e apresentam grande dispersão nas suas propriedades.

Os materiais compósitos dividem-se em quatro grupos, dependendo da sua constituição: de partículas, de fibras, laminares e naturais, representados na Figura 2.1 [3].

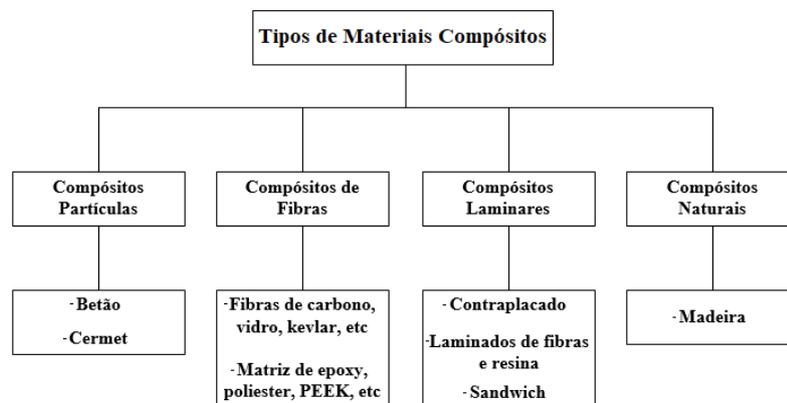


Figura 2.1. Tipos de Materiais Compósitos [3].

### 2.1.1. Matriz e Reforço

O material final, resultante da combinação de dois ou mais materiais, necessita de adesão, caso contrário não teriam utilidade, necessitando assim de uma matriz para a formação do compósito.

A matriz pode ser um metal, um polímero ou um cerâmico, sendo o grupo das matrizes poliméricas o mais comum, vulgarmente conhecidas por resinas, que podem ser termoendurecíveis ou termoplásticos.

O material em estudo é uma matriz polimérica reforçada com fibras. A matriz tem a função de estabilizar a forma do componente e transmitir as forças entre as fibras. Ao manter separadas uma fibra da outra, a matriz promove a resistência à fadiga do material, uma vez que impede que as fibras adjacentes propaguem eventuais falhas [4]. Tem também a função de proteger as fibras contra danos superficiais em decorrência de abrasão mecânica ou de reações químicas com o ambiente [5].

O reforço é, de uma maneira geral, a parte interna do material compósito, e representa a parte mais importante, em termos de propriedades mecânicas, uma vez que é este o componente que confere as propriedades mecânicas finais. Estas propriedades dependem de diversos fatores, como por exemplo a aplicação do compósito, orientação, distribuição, tamanho e forma dos seus constituintes.

Uma vez que existem diferentes tipos de reforço, os compósitos podem ser divididos em dois grupos, em função do reforço, dependendo se são reforçados por partículas, ou por fibras, Figura 2.2.

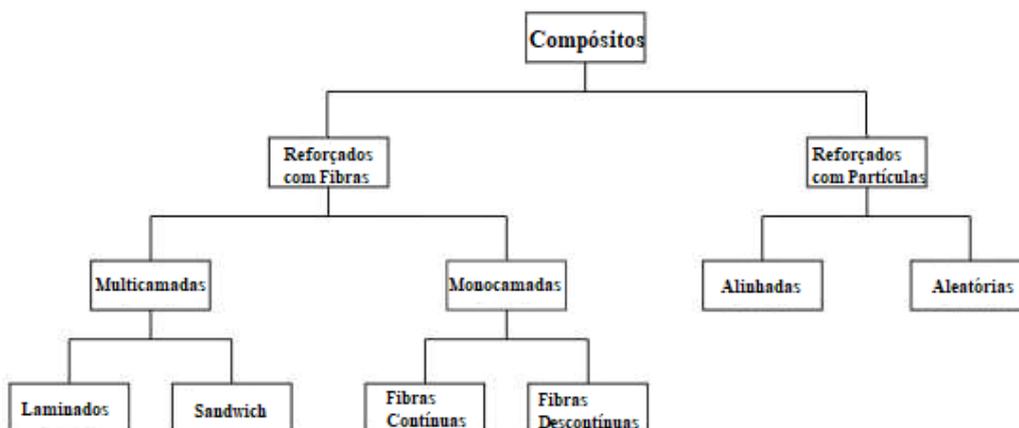


Figura 2.2. Tipos de Reforços [6].

De um modo geral, existem diversas conjunções de matriz e de reforço, representadas na Figura 2.3, exemplificando as diferentes naturezas dos constituintes [7].

<i>Matriz</i>		<i>Reforço</i>	
Orgânica (PMC's– Polymer Matrix Composites)	Polímeros Termoplásticos Polímeros Termoendurecíveis	Mineral	- Fibra de vidro - Fibra de Carbono
		Orgânico	- Aramida - Poliamida
		Metálico	- Boro - Alumínio
Metálica (MMC's– Metal Matrix Composites)	Ligas leves de Alumínio, Magnésio, Titânio	Mineral	- Carbono - Carboneto de silício
		Metálico	- Boro
		Misto	- Boro revestido com Carboneto de Silício
Cerâmica (CMC's–Ceramic Matrix Composites)		Mineral	Carbonetos
		Metálica	Boro ou Tungsténio

Figura 2.3. Natureza dos Constituintes dos Materiais Compósitos [7].

## 2.1.2. Materiais Compósitos de Matriz Polimérica

Tratando-se o material em estudo composto por uma matriz polimérica, apenas se vão abordar estes. Este tipo de materiais é bastante utilizado na maioria das indústrias, sem qualquer restrição, uma vez que têm baixa densidade, tornando-os leves, apresentam uma boa resistência química, contra degradação de produtos químicos, e uma elevada resistência mecânica, devido às varias combinações possíveis entre a resina e o reforço, que os leva a suportar cargas consideráveis.

Na Figura 2.4, estão representados os materiais mais comuns de matriz polimérica, e os reforços associados a estas.

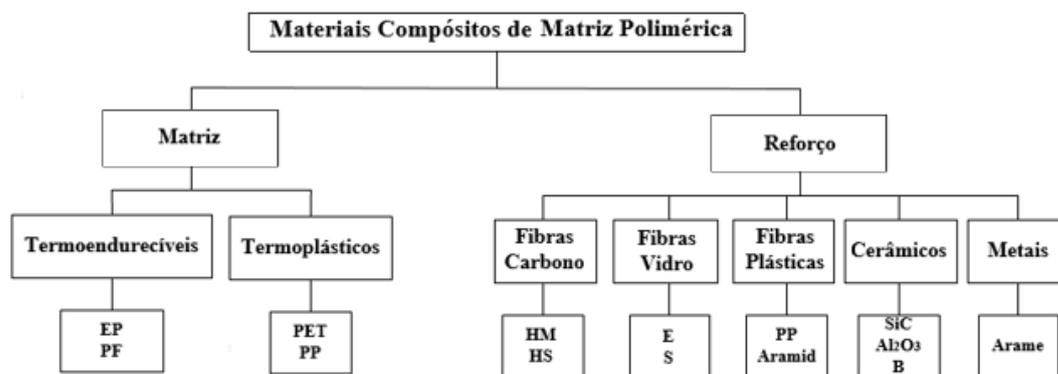


Figura 2.4. Compósitos de matriz polimérica e reforços [3].

Estas matrizes, como já referido anteriormente, podendo ser termoendurecíveis ou termoplásticos, diferem entre si pelo seu tipo de ligação molecular, que é feito através de ligações covalentes fortes e ligações de Van der Waals mais fracas, respetivamente. No entanto, as matrizes poliméricas apresentam a desvantagem de terem uma baixa capacidade de suportar elevadas temperaturas, a partir dos 100°C [4].

### 2.1.2.1. Termoendurecíveis

Estas resinas são por norma os polímeros mais usados, ainda que os termoplásticos possam ser reciclados, os termoendurecíveis têm maior resistência, melhor estabilidade dimensional, e podem ser processados a temperaturas e pressões baixas, e são simples de manufacturar.

Na Tabela 2.1, apresentam-se as vantagens e desvantagens das resinas, bem como as suas propriedades. Dos três tipos, é a resina epóxi o constituinte do material em

estudo. Pode perceber-se então que ainda que dispendiosas, as suas propriedades mecânicas se sobrepõem.

A resina epóxi tem o seu nome devido à sua estrutura molecular, em que o elemento oxigénio está presente. No seu processo de fabrico usa-se um endurecedor, sendo que o processo de cura forma o polímero da matriz [4]. Esta resina é também um bom isolante elétrico.

**Tabela 2.1.** Vantagens e Desvantagens de Resinas [1].

	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<b>Poliéster</b>	Fácil de usar Resinas disponíveis mais baratas	Propriedades mecânicas médias Trabalho de número limitado
<b>Viniléster</b>	Grande resistência química e ambiental Melhores propriedades mecânicas do que os poliésteres	Pós-cura requerida para melhores propriedades Grandes quantidades de estireno Mais caro que os poliésteres Encolhimento de alta cura
<b>Epóxi</b>	Boas propriedades mecânicas e térmicas Resistente à água Tempos de trabalho elevados Encolhimento de baixa cura	Mais caro que os vinilésteres Mistura complicada Manuseamento corrosivo

### 2.1.3. Materiais Compósitos Reforçados com Fibras

Os compósitos reforçados com fibras, em que estas são o constituinte que confere as propriedades finais do material, apresentam elevada resistência e rigidez, boa resistência à corrosão e condutividade elétrica. Estas podem ser contínuas ou descontínuas, sendo que as últimas são mais fáceis de processar, mas com menor eficiência de reforço.

Podem ser unidirecionais ou multidirecionais, dependendo da orientação das camadas, se sempre iguais ou se duas direções perpendiculares ou ainda se com uma orientação aleatória, Figura 2.5. Estas orientações, juntamente com a forma, comprimento e composição das fibras, irão ditar as propriedades finais do compósito[4].

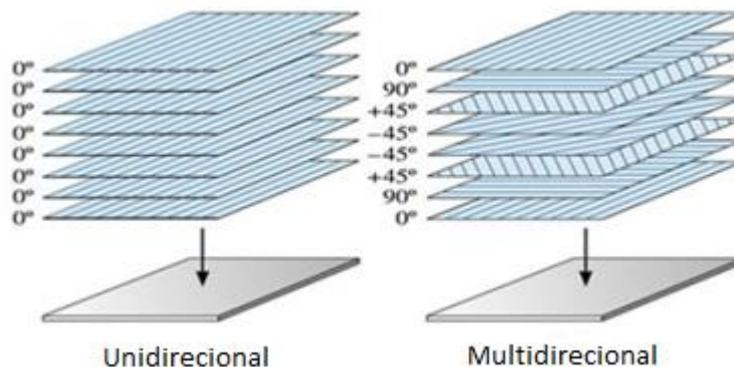


Figura 2.5. Representação das Orientações das Fibras [4].

Existem vários tipos de fibras, sendo as mais comuns as de carbono, as aramidas e as de vidro. As fibras de vidro são as mais utilizadas na indústria, devido à combinação entre as suas propriedades mecânicas e o seu baixo preço. As fibras aramidas, também conhecidas como Kevlar, que se encontram, por exemplo, nos coletes à prova de bala, são bastante usadas, sendo que uma das propriedades mais importantes é a elevada resistência ao corte [4], no entanto o seu custo é superior às fibra de vidro.

#### 2.1.3.1. Fibras de Carbono

Neste estudo vai-se recorrer a fibras de carbono como reforço. São as mais caras, porém são as que apresentam as melhores características para a maioria das aplicações, com uma densidade menor, como se pode ver na Tabela 2.2.

Estas fibras sintéticas são compostas por diversos filamentos de alta resistência específica e obtidas através de fibras orgânicas ricas em carbono. Existem dois tipos: umas com elevado módulo de elasticidade, e outras com elevada resistência, em que se diferenciam pelo arranjo da molécula hexagonal da grafite. No entanto, têm uma reduzida resistência ao impacto.

São produzidas a partir de precursores orgânicos, derivadas das fibras de poliácridonitrila (PAN), e através de processos de extrusão, tensionamento, tratamento térmico, oxidação e carbonização, que levam à obtenção das excelentes propriedades[4].

**Tabela 2.2.** Propriedades mecânicas básicas de fibras e outros materiais [1].

Material	Resistência à tração [MPa]	Módulo de elasticidade [GPa]	Densidade típica [g/cc]
Carbono HS	3500	160-270	18
Carbono IM	5300	270-325	18
Carbono HM	3500	325-440	18
Carbono UHM	2000	440+	20
Aramida LM	3600	60	145
Aramida HM	3100	120	145
Aramida UHM	3400	180	147
Vidro – E	2400	69	25
Vidro – S2	3450	86	25
Vidro – quartzo	3700	69	22
Alumínio	460	72	28
Titânio	9300	110	45
Aço Inox	1450	197	79
Aço extrudido	2410	207	78

## 2.2. Degradação de Materiais Compósitos

Com o aumento do uso dos materiais compósitos nas diversas indústrias, estes estão expostos a diferentes ambientes durante o seu tempo de serviço, sendo que essa exposição pode causar a degradação da integridade estrutural do compósito. Importa então, conhecer o ambiente em que se encontram, bem como avaliar o efeito deste nas propriedades mecânicas dos compósitos.

Os principais mecanismos de falhas dos materiais compósitos são: delaminação, rotura da matriz, separação entre fibra e matriz, e falha de fibras. Estes mecanismos podem estar ligados entre si, em que a rotura da matriz por norma é a primeira a ocorrer, e pode levar à ocorrência de outros. A rotura da matriz, expõe as fibras ao meio ambiente, que leva à falha das mesmas. A aplicação de cargas no material, pode levar à descolagem entre a fibra e matriz, quando a ligação destas é fraca, provocando assim uma deformação elástica. A delaminação ocorre em compósitos compostos por várias camadas, em que uma fenda formada na matriz se transmite para as camadas adjacentes, até que a última ceda [8].

Existem vários estudos em que é reportada a degradação de compósitos, por ação de água salgada, ácidos, óleos corrosivos, incêndios e relâmpagos. Interessa, no caso em estudo, conhecer a influência da exposição a correntes elétricas na integridade estrutural do compósito.

Em relação ao efeito dos relâmpagos são vários os autores [9–11] que descrevem o dano provocado por estes. Inspeções visuais mostram a rutura das fibras, ao longo de várias camadas, degradação de fibras e resina na zona de descarga. A rotura das fibras é causada, principalmente, pela combinação da onda de choque e pela rápida evaporação da resina através do aquecimento resistivo. A deterioração da resina é causada pelo efeito do aquecimento resistivo da superfície da camada combinada com a alta temperatura atmosférica devido a quebra de isolamento de ar [12]. Esta degradação estrutural acontece para descargas elétricas muito elevadas, durante curtos períodos de tempo.

Em situações em que as temperaturas atingidas são menores que a dos raios, ou que o tempo de exposição seja mais duradouro, ainda que o dano não seja detetável a olho nu, este pode comprometer o material. Este dano irá depender de diversos fatores, tais como o ambiente, o arrefecimento, o tempo de exposição, e especialmente da componente química da matriz polimérica [13].

Segundo Matzkanin [14], existem falhas mecânicas e alterações das propriedades mecânicas dos materiais compósitos sujeitos a longas exposições, que podem diferir consoante a exposição a temperaturas médias (177°C a 371°C) ou altas (460°C a 2982°C). Para situações de exposição a temperaturas médias os danos, tais como delaminações, não são visíveis, no entanto quando se atingem temperaturas altas, estes danos podem já ser visíveis no material.

As delaminações poderão ser vistas com recurso a sistemas ultrassónicos, por exemplo o C-Scan, e a capacidade de detetar estes defeitos dependerá das temperaturas atingidas pela matéria, da resistência, potencia e tempo de exposição.

### **2.3. Comportamento Elétrico**

O comportamento elétrico do compósito, segundo a direção da espessura, deve ser conhecido, uma vez que neste estudo é a direção mais solicitada. A compreensão de todos

---

os fenómenos que ali ocorrem será fundamental para analisar os resultados que irão ser obtidos com os ensaios.

Uma vez que as fibras de carbono são condutoras e a matriz epóxi não condutora, seria de esperar que a resistividade elétrica, isto é, a medida de oposição do material ao fluxo de corrente elétrica, fosse infinita. No entanto, este facto não se verifica, logo existe contacto entre as fibras [13].

Segundo Wang e Chung [13], a resistividade foi usada como indicador de delaminação, uma vez que a diminuição do contacto entre fibras implica o aumento da resistividade. É também referida a importância do aumento temperatura, por efeito Joule, no salto de eletrões entre as lâminas, que possibilita a condução.

Sierakowski *et al.* [11] determinaram a variação da temperatura ao longo da espessura das placas, quando a corrente é aplicada na direção das fibras. Verificaram que a temperatura depende da espessura do compósito, e o seu máximo é atingido no meio da placa, independentemente da resposta viscoelástica que pode ocorrer, e que as tensões térmicas no compósito não podem ser ignoradas.

Deierling e Zhupanska [10] referem que para correntes elétricas de grandezas na ordem dos micro amperes, os efeitos nos compósitos são considerados inofensivos. No presente estudo irão usar-se intensidades de 1A e 3A, que ainda que longe das intensidades de relâmpagos. Amaro *et al.* [15] e Farto [6] mostraram, recentemente, que para estas intensidades, e laminados carbono/epóxi semelhantes, já se verificam degradações a nível estrutural significativas as quais não podem ser desprezadas na avaliação da integridade estrutural do compósito.

## 2.4. Comportamento Viscoelástico

Os materiais que apresentam um comportamento viscoelástico, têm as suas propriedades mecânicas dependentes do tempo, isto é, a relação tensão/deformação varia com o tempo. Estes apresentam simultaneamente características viscosas e elásticas [16].

Num comportamento elástico, a deformação elástica é reversível, e desaparece após o material deixar de ser solicitado. Para um comportamento viscoso, em que a viscosidade representa uma quantidade que descreve a resistência que o material oferece ao escoamento, forçado a escoar pela ação de uma força, e quando esta é retirada, o material

para de escoar. Este fenômeno é representado pelo elemento viscoso, de acordo com a lei de Newton da viscosidade [16]. A esse comportamento dualístico, dá-se o nome de viscoelasticidade.

Os polímeros, devido à sua estrutura molecular complexa, têm propriedades que dependem do tempo, comportando-se como sólidos em resposta a uma carga aplicada rapidamente, e tendem a ter um comportamento característico de fluidos viscosos caso a carga seja aplicada mais lentamente, ou em tempos muito longos de carregamento [17].

Assim, uma vez que a matriz polimérica apresenta um comportamento viscoelástico, os compósitos com estas matrizes exibem um comportamento em que a tensão e deformação estão dependentes do tempo e da temperatura. O fenômeno de viscoelasticidade destes compósitos deve-se às longas cadeias moleculares de matriz polimérica [18].

As matrizes de epóxi geralmente têm um comportamento dúctil abaixo da sua temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), ou até mesmo um comportamento frágil para temperaturas muito baixas, enquanto que acima da  $T_g$  mostram uma natureza viscoelástica. De acordo com o fabricante, a resina utilizada apresenta uma  $T_g$  cerca de 125 °C [15].

## **2.5. Flexão em Três Pontos e Relaxação de Tensões**

O ensaio de flexão em três pontos (3PB) consiste na aplicação de uma carga, numa viga biapoiada, que aumenta com o tempo, até ocorrer ruptura do provete. Este ensaio é bastante utilizado em polímeros, cerâmicos e metais duros, uma vez que fornece informações sobre o módulo de rotura à flexão, de elasticidade, módulo resiliência e tenacidade [19].

O ensaio de relaxação de tensões, permite avaliar o comportamento viscoelástico de um polímero. Neste ensaio é aplicada uma tensão inicial, provocando assim uma deformação no provete que se manterá constante, que irá diminuir ao longo do tempo. A relaxação de tensões é expressa em percentagem da tensão inicial, em relação à tensão final [20].

Uma vez que a relaxação de tensões consiste na aplicação de uma carga durante um período considerado longo, num compósito com matriz polimérica, irá existir um comportamento viscoelástico. Este ensaio é influenciado pela relação da transferência de

tensão aplicada com o tempo na interface matriz-fibra, podendo-se assim caracterizar a viscoelasticidade de um compósito através deste comportamento [21].

Obaid *et al.* [21] verificaram que as fibras curtas, que são adicionadas num compósito com o fim de diminuir a taxa de relaxação de tensões, não apresentam um comportamento dependente do tempo. Porém, quando embebidas numa matriz viscoelástica, o seu comportamento irá depender do tempo. Estes autores associaram este facto às ligações covalentes entre as duas fases, que inibem a mobilidade do polímero, reduzindo assim a tensão de relaxação.

Neste contexto, no presente estudo em causa será comparado o comportamento viscoelástico dos laminados carbono/epóxi, sem degradação alguma, e após uma degradação elétrica, de modo a entender-se o efeito desta degradação.



### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo pretende-se descrever toda a metodologia usada para se atingir os resultados pretendidos. É descrito o material em estudo, isto é, como foi produzido, as dimensões e orientações dos provetes, a degradação que foi induzida nestes, os tratamentos de informação após a degradação e por fim, os ensaios realizados e as condições em que foram feitos.

#### 3.1. Materiais

Os laminados de carbono/epóxi foram preparados, de acordo com as recomendações do fabricante, a partir de pré-impregnados de carbono unidirecional de alta resistência “TEXIPREG HS 160 REM”, usando o processo de moldagem em autoclave/saco de vácuo. Na produção, o procedimento usado foi: fazer a bolsa hermética e aplicar 0,05 MPa de vácuo; aquecer até 125°C a uma taxa de 3 a 5°C/min; aplicar uma pressão de 0,5 MPa quando se atingir uma temperatura de 120 ou 125°C. Mantendo a pressão e a temperatura ao longo de 60 minutos; arrefecer até à temperatura ambiente mantendo a pressão e por fim retirar a peça do molde. A fração volumétrica de fibra de carbono é de 40%. As placas foram fabricadas num tamanho útil de 300×300×2,4 [mm<sup>3</sup>], não unidirecionais, com orientações de [0<sub>4</sub>,90<sub>4</sub>]<sub>s</sub>, de 16 camadas e 2,4 mm de espessura.

Os provetes foram seccionados com tamanhos de 100×10 [mm<sup>2</sup>] e 70×10 [mm<sup>2</sup>], Figura 3.1. A ideia era verificar se o tamanho da amostra tinha influência na degradação do material, através da passagem da corrente elétrica, sendo que a largura e espessura foram mantidas constantes. Quanto à largura e espessura, estas são uma aproximação, uma vez que devido à necessidade de seccionar as placas, é sempre difícil obter uma medida exata, tal como a conformação das placas, pelo que foi necessário medir todos os provetes, em várias secções e realizar a média dos valores.



Figura 3.1. Amostras de 70 mm e 100 mm.

### 3.2. Degradação Elétrica

O sistema experimental para efetuar a degradação elétrica é apresentado na Figura 3.2, bem como a sua legenda. A Figura 3.3 ilustra o mesmo esquema do ponto de vista elétrico.

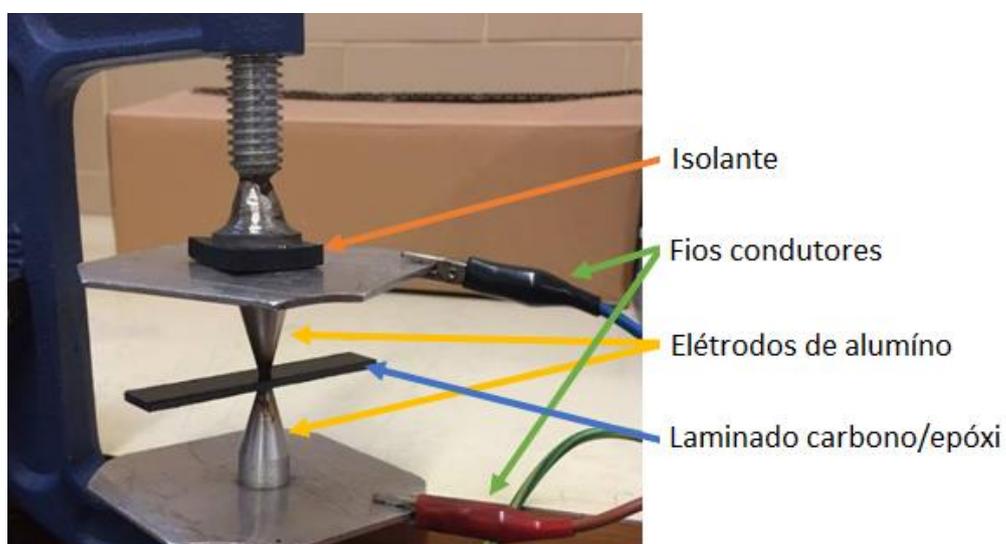


Figura 3.2. Montagem para a realização da degradação elétrica.

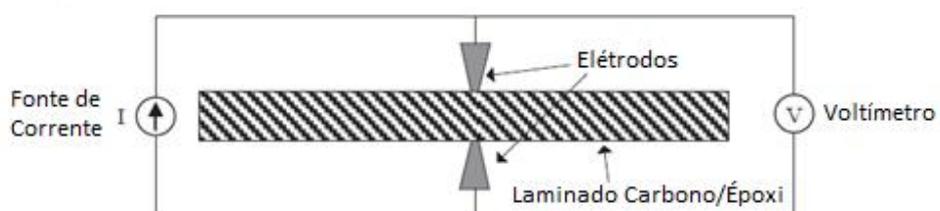


Figura 3.3. Esquema do sistema de descarga elétrica [15].

Este sistema é formado com um grampo com 2 elétrodos de alumínio, com 3 mm de diâmetro, devidamente isolados, fixando o provete a ensaiar. Estes elétrodos são ligados a uma fonte de alimentação (THURBY THANDAR 32V-2A).

### 3.3. C-Scan

O C-Scan ultrassónico, por imersão, foi utilizado para analisar os defeitos provocados pela degradação elétrica. É uma técnica, de cariz não-destrutivo, em que é feita uma excitação elétrica de uma sonda ultrassónica que cria uma onda mecânica que após atravessar o meio de propagação, é recolhido pela mesma sonda (pulso-eco). Neste trabalho foi utilizado um transdutor focalizado com frequência de 5 MHz em modo pulso-eco e um sistema mecânico com três eixos montado sobre uma tina de água para varrimento do provete.

O sistema de varrimento mecânico, representado na Figura 3.4, perpendicular à direção de propagação, recolhe os sinais em toda a extensão do provete, construindo assim uma imagem em função de cores, que permite identificar a presença de defeitos. Este método, é afetado pela heterogeneidade do material, nas fibras ou defeitos pré-existentes, necessitando assim de um tratamento do sinal recolhido.



Figura 3.4. Setup C-Scan.

### 3.4. Ensaios

Na realização dos ensaios 3PB e SR, de acordo com as normas ASTM D790-2 e E 328-02 respetivamente, foi usada a máquina de testes universal Shimadzu AG-10, Figura 3.5, de elevado nível tecnológico, equipada com uma célula de carga de 5kN, que permite obter resultados bastante precisos, na ordem dos 0,001%.

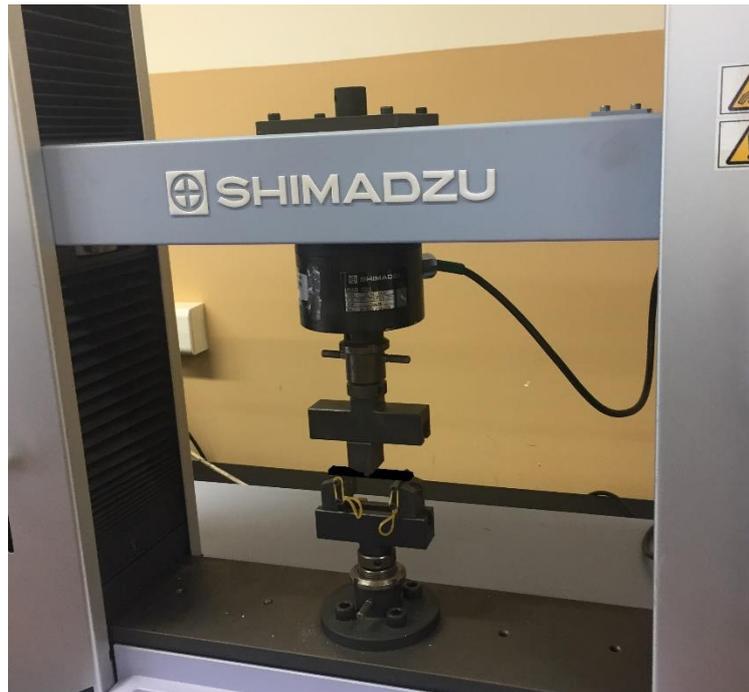


Figura 3.5. Shimadzu AG-10.

Na Figura 3.5, é possível ver o equipamento usado para os ensaios, em que o *span*, distância entre os apoios, é, de acordo com a norma ASTM D790-2, de 48 mm, ou seja, deve ser 16 vezes superior à espessura dos provetes.

Numa primeira fase foi necessária a medição de todos os provetes, em 3 secções, nos extremos e no centro, da largura e espessura, fazendo a respetiva média, de modo a usar estes dados no software *Trapezium X*, necessários a para obtenção da tensão de rutura à flexão.

$$\sigma_R = \frac{3PL}{2bh^2}. \quad (3.1)$$

Após conhecer estes valores, foi possível a realização dos ensaios de 3PB, ensaio necessário para determinar a tensão de rotura à flexão, obtida através da equação (3.1), deverá ser conhecida de modo a ser usado um valor de tensão menor que este no ensaio

de relaxação de tensões (SR). Deste modo, garante-se que se está sempre a trabalhar no domínio elástico.

Na Figura 3.6 pode ver-se o procedimento dos dois ensaios. No ensaio 3PB foi usada uma velocidade de 3 mm/min na aplicação da carga. Para o SR com duração de 7200 seg foi usada a mesma velocidade, com aplicação de uma tensão inicial, descrita no ponto que se segue.

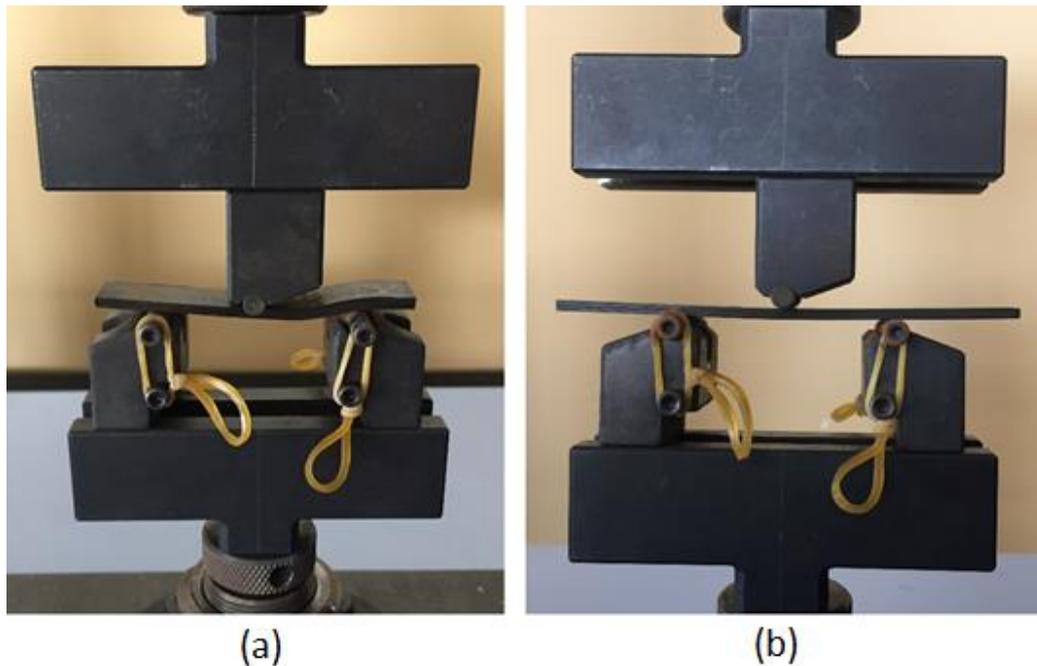


Figura 3.6. Ensaios: (a)- 3PB; (b)- SR.

### 3.5. Procedimento

No procedimento experimental começou-se pelo seccionamento dos provetes nas medidas anteriormente referidas. De seguida, identificaram-se e mediram-se os provetes. Alguns foram usados como amostras de controlo (CS) e os restantes, sujeitos à degradação elétrica. Para se garantir que os resultados obtidos traduzissem apenas os efeitos produzidos pela degradação imposta alguns dos provetes foram visualizados por C-Scan antes de degradados.

A degradação elétrica, usando a fonte de alimentação anteriormente referida, foi feita para uma tensão de saída de 20V, limitando a corrente a 1A e 3A. Este processo foi repetido em várias amostras, usando diferentes tempos de exposição (uma, duas e quatro horas). Para cada um destes parâmetros, foram submetidas seis amostras às descargas, três

para o ensaio 3PB, e três para o ensaio SR. Após as descargas, as amostras que tinham sido analisadas no C-Scan, voltaram a ser visualizadas.

De seguida, procedeu-se aos ensaios de 3PB, das amostras de controlo e das amostras já degradadas, onde se verificou que os provetes com 100 mm de comprimento tinham um maior valor de tensão de limite de elasticidade que os de 70 mm, decidindo-se então usar valores diferentes para a tensão inicial nos ensaios de SR, que foram os últimos a ser realizados.

## 4. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidas as variações que ocorreram no material, tal como o seu comportamento e resultados dos ensaios realizados.

### 4.1. Flexão em Três Pontos (3PB)

Como referido anteriormente, é necessária a realização dos ensaios de 3PB antes dos ensaios de SR. Através dos ensaios de 3PB, é possível elaborar um gráfico tensão-deslocamento, de modo a avaliar a zona elástica da curva, e determinar a tensão de rotura à flexão. Para cada caso em estudo, foram realizados três ensaios, seguida de uma análise à média de valores de tensão e deslocamento. Para os provetes de controlo (CS) foram obtidos os seguintes resultados, Figura 4.1. Para as amostras de CS apenas foram utilizados provetes com 100 mm de comprimento.

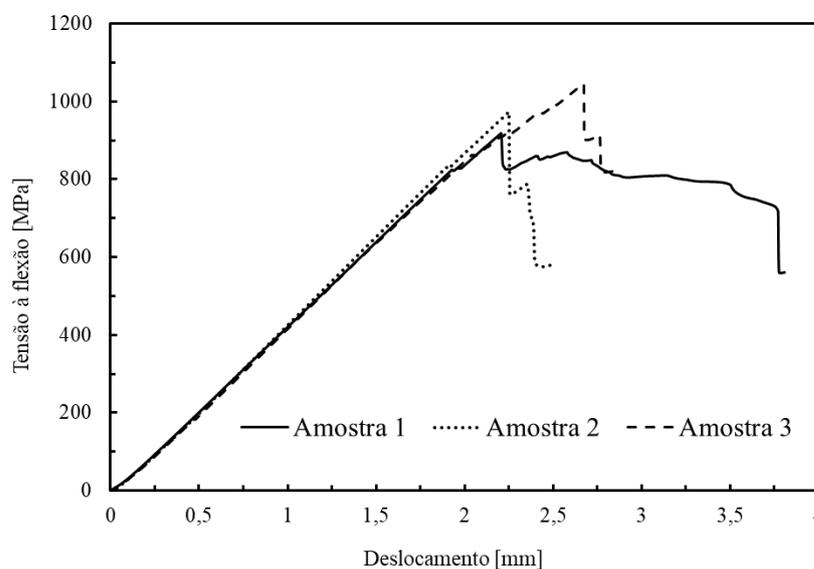


Figura 4.1. 3PB provetes de controlo.

Após uma análise detalhada a cada curva tensão/deslocamento, determinou-se a tensão média de rotura à flexão, de 857 MPa, para as amostras de controlo. De seguida, procedeu-se da mesma maneira para as amostras submetidas à degradação, Figura 4.2 a Figura 4.4, obtendo-se os resultados da Tabela 4.1.

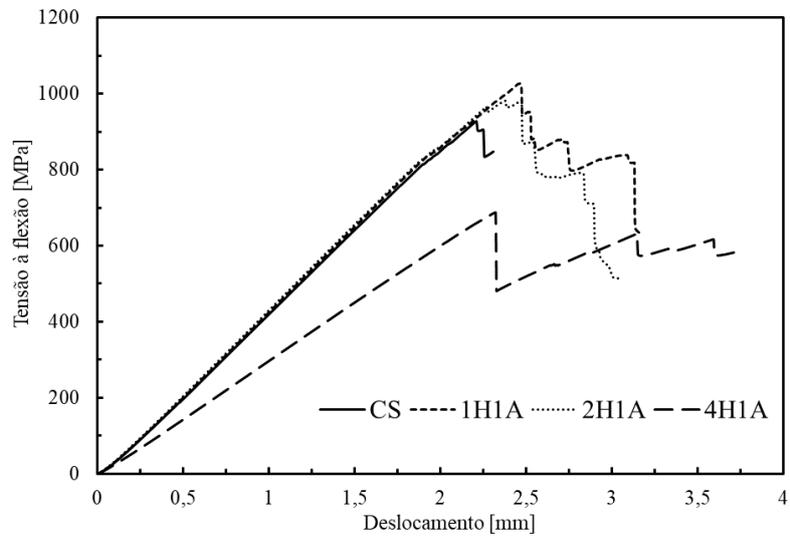


Figura 4.2. 3PB amostras de 100 mm degradadas com intensidade de corrente de 1 A.

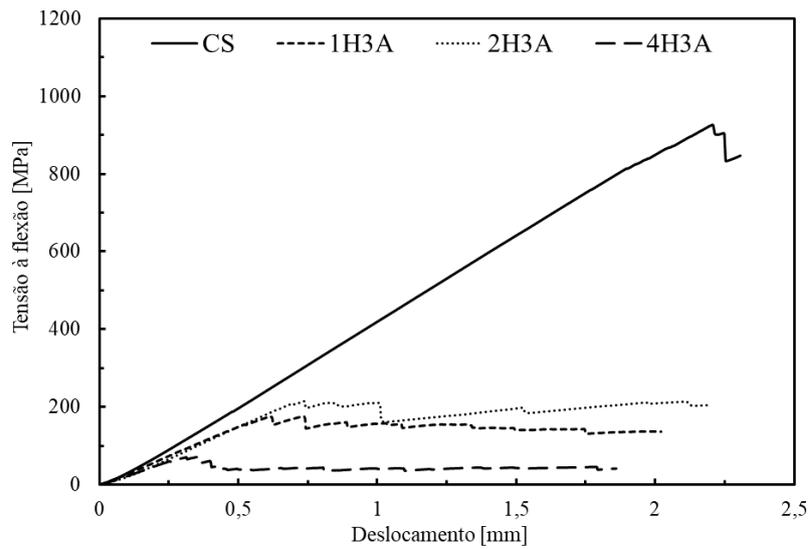
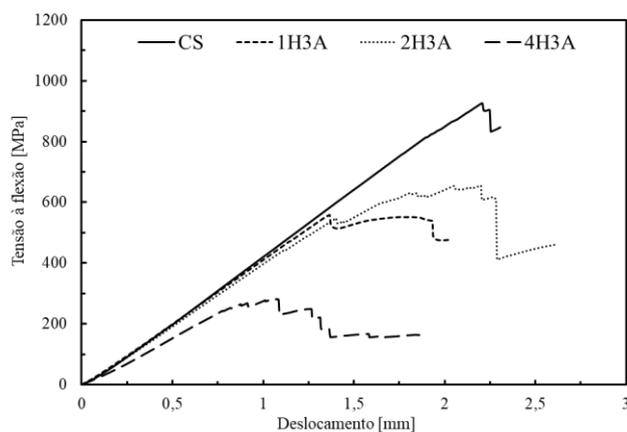


Figura 4.3. 3PB amostras de 70 mm degradadas com intensidade de corrente de 3 A.



**Figura 4.4.** 3PB amostras de 100 mm degradadas com intensidade de corrente de 3 A.

As diferenças observadas quando se comparam alguns dos provetes com o CS deve-se ao facto dos provetes apresentarem menor comprimento, como será explicado mais à frente.

**Tabela 4.1.** Tensão de Ruptura Média à Flexão.

Amostras	Tensão Média à Flexão [MPa]	Desvio Padrão [MPa]
CS	857,7	19,6
100 mm 1H-1A	837,3	7,8
100 mm 2H-1A	825,9	9,7
100 mm 4H-1A	734,0	12,3
100 mm 1H-3A	558,0	31,8
100 mm 2H-3A	466,5	59,9
100 mm 4H-3A	260,5	10,6
70 mm 1H-3A	131,0	48,7
70 mm 2H-3A	126,3	24,7
70 mm 4H-3A	68,7	10,1

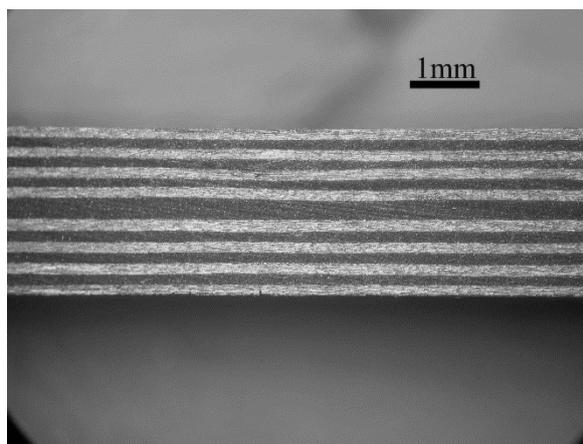
Os resultados mostrados na Tabela 4.1, foram obtidos através da análise de cada uma das curvas das Figura 4.2 a Figura 4.4. Nestas curvas, apenas em algumas se consegue

perceber a diminuição de tensão que representa a tensão de rotura à flexão, uma vez que os gráficos foram obtidos realizando a média dos valores de três amostras, em cada um dos casos. É possível ver que a degradação elétrica não só afeta a tensão de rotura, como também o módulo de elasticidade, em alguns casos.

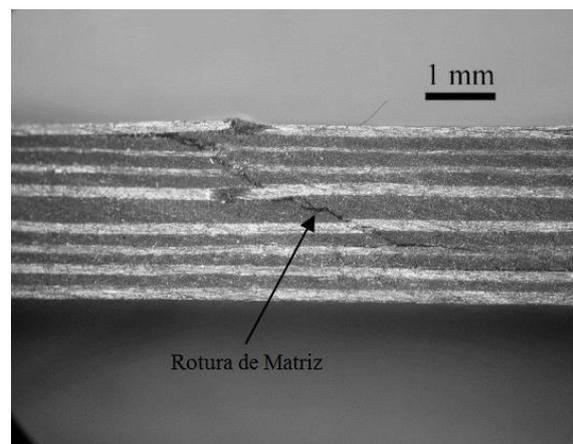
Com base nestes resultados é possível verificar que os danos provocados pelas descargas, têm grande influência nas alterações do comportamento das amostras. Para exposições à corrente de 1 A, há uma redução de cerca de 14,4 % na tensão de rotura. Em relação às amostras sujeitas a intensidade de corrente de 3 A, o dano é maior, sendo que melhor situação verificada para estas amostras, foi a redução de 35 %, quando comparada a tensão de rotura com os provetes de controlo. Já o pior caso foi para amostras de 70 mm, degradadas a 3 A ao longo de quatro horas, as quais verificaram uma diminuição de 92 % de tensão de rotura à flexão.

É possível verificar que para amostras do mesmo tamanho, existe maior degradação quanto maior for a intensidade de corrente, e quanto maior for o tempo de exposição, o que está de acordo com Amaro *et al.* [15]. Para amostras de tamanhos diferentes, quanto menor for o tamanho, maior será a degradação.

De modo a entender-se melhor o efeito da degradação elétrica na integridade estrutural do compósito, várias amostras foram visualizadas com recurso ao microscópio ótico, Figura 4.5 a Figura 4.8.



**Figura 4.5.** Laminado carbono/epóxi sem degradação.



**Figura 4.6.** Amostra de controlo após 3PB.

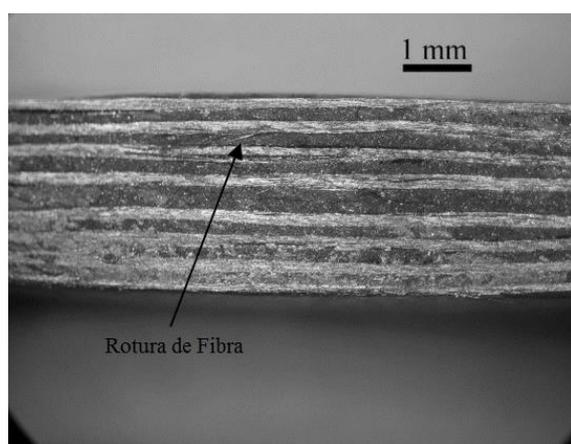


Figura 4.7. Amostra degradada 4H-3A após 3PB.

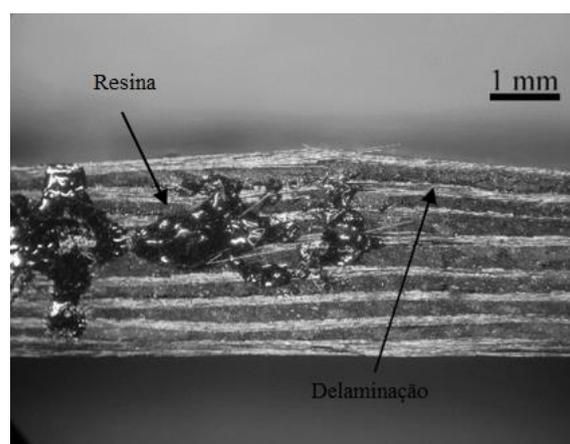


Figura 4.8. Amostra degradada 2H-3A após 3PB.

Na Figura 4.5 é apresentado um laminado carbono/epóxi sem qualquer tipo de degradação. De seguida, apresenta-se uma amostra de controlo, submetida ao ensaio de 3PB, Figura 4.6, em que se pode observar a rotura de matriz derivada ao ensaio de 3PB. Na Figura 4.7, para além da rotura das fibras, pode ver-se o efeito da delaminação, ocorrido antes do ensaio de 3PB, provocado pela degradação elétrica. Por fim, apresenta-se outro fenómeno proveniente da degradação, Figura 4.8, que ocorreu em poucas amostras, em que além dos três tipos de danos já referidos, também se observou a separação fibra-matriz. O tipo de dano que surge nos compósitos sujeitos a corrente elétrica pode ser justificado pelo efeito de Joule criado, sendo que a literatura também se refere à contribuição significativa do calor gerado ao longo da interface eletrodo-compósito [22-23].

## 4.2. Relaxação de Tensões (SR)

Após a realização dos ensaios de 3PB, e análise dos mesmos, foram efetuados os ensaios de SR. Novamente, para cada caso, foram realizados três ensaios, de maneira a obter-se uma curva menos suscetível a erros.

Com a análise dos resultados dos ensaios de 3PB, definiu-se, para tensão inicial dos ensaios de SR, 200 MPa para as amostras de 100 mm de comprimento, e 42 MPa para as amostras de 70 mm. Estes valores foram definidos com base num critério de segurança, recorrendo a um coeficiente de segurança de 1,3 de modo a evitar que durante os ensaios de SR o do regime elástico fosse ultrapassado, tendo em conta os menores valores de tensão de rotura registados, que correspondem à degradação durante 4h, com intensidade de 3 A.

No fim da realização de todos os ensaios, compararam-se os valores de cada caso com os de controlo, obtendo-se os resultados da Figura 4.9 à Figura 4.11.

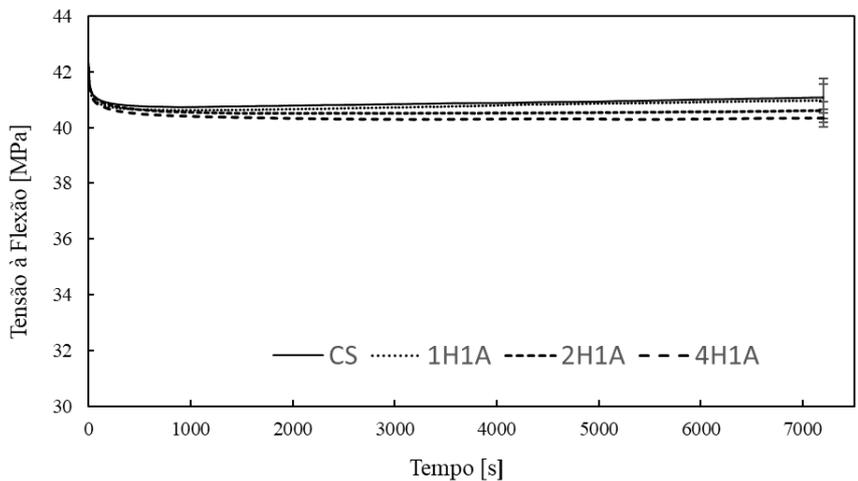


Figura 4.9. SR amostras de 70 mm degradadas com intensidade de corrente de 1 A.

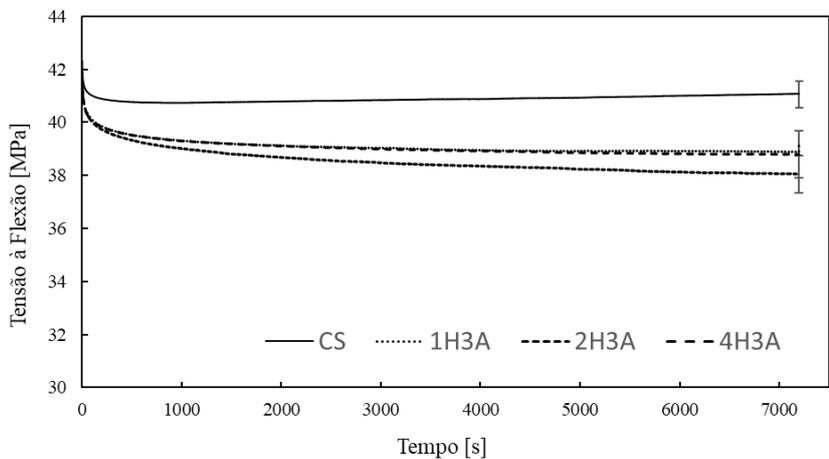
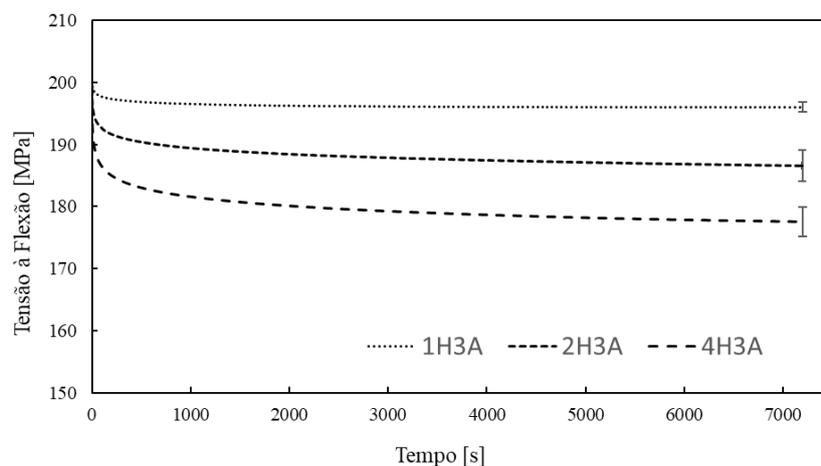


Figura 4.10. SR amostras de 70 mm degradadas com intensidade de corrente de 3 A.



**Figura 4.11.** SR amostras de 100 mm degradadas com intensidade de corrente de 3 A.

Os resultados obtidos dos ensaios de SR, embora tratando-se de curvas médias de três amostras, vão maioritariamente ao encontro dos resultados dos ensaios de 3PB. É possível verificar que, para amostras do mesmo tamanho, sujeitas à mesma intensidade de corrente, quanto maior for o tempo de exposição, maior a relaxação de tensões, o que significa que o material diminuiu a sua integridade estrutural, isto é, a capacidade de suportar solicitações exteriores. No caso de intensidades diferentes, para 3 A, existe maior relaxação de tensões que para 1 A.

O efeito do tamanho, da intensidade de corrente e do tempo será discutido na subsecção que se segue.

Os valores médios das tensões obtidos durante os ensaios são apresentados na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2.** Relaxação de Tensões.

<b>Amostras</b>	<b>Tensão Final [MPa]</b>	<b>Relaxação de Tensão [MPa]</b>
CS	41,08±0,87	0,92
70 mm 1H-1A	40,97±1,20	1,03
70 mm 2H-1A	40,61±0,38	1,39
70 mm 4H-1A	40,34±0,43	1,66
70 mm 1H-3A	39,16±1,94	2,84
70 mm 2H-3A	38,05±0,67	3,95
70 mm 4H-3A	38,79±1,06	3,21
100 mm 1H-3A	196,00±0,24	4,00
100 mm 2H-3A	186,57±3,52	13,43
100 mm 4H-3A	177,55±3,32	22,45

#### **4.2.1. Efeito da Intensidade de Corrente e do Tempo**

A partir das Figura 4.9 e Figura 4.10 foi possível perceber o efeito da intensidade de corrente e do tempo na relaxação de tensões das amostras. Para amostras de 70 mm de comprimento, para a mesma intensidade de corrente, 1 A ou 3 A, quanto maior é o tempo de exposição, maior será a relaxação de tensões, como se pode ver na Tabela 4.2.

Outra ilação que se pode tirar em amostras do mesmo tamanho, para o mesmo tempo de exposição, para uma intensidade de 3 A, há maior relaxação de tensões do que para 1 A.

Assim, para uma amostra de 70 mm, cuja exposição foi de 1h a uma intensidade de 1 A, sendo solicitada com uma tensão inicial de 42 MPa, apresentou uma relaxação de tensão de 1,03 MPa, ou seja, 2,45 %. Comparando essa mesma amostra, com uma exposta à mesma corrente, mas num intervalo de tempo de 4h, que apresenta uma tensão final de 40,34 MPa, ou seja, uma relaxação de tensões de 3,95%, é possível ver que o aumento de tempo provocou um aumento de 1,5 % na relaxação de tensões. Comparando a mesma primeira

amostra, com outra da mesma dimensão, com o mesmo tempo de exposição, mas submetida a uma corrente de 3 A, observa-se que a segunda amostra que teve uma relaxação de tensões de 6,76%, ou seja, um aumento de 4,31%.

É possível perceber, que o aumento da intensidade de corrente elétrica provoca uma relaxação de tensões maior do que o aumento do tempo de exposição, Figura 4.12 a Figura 4.14.

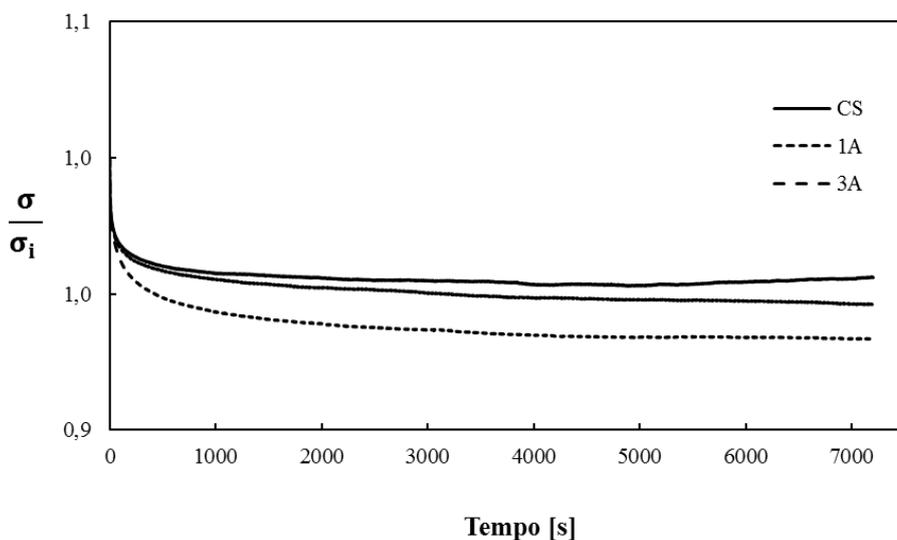


Figura 4.12. Efeito da intensidade de corrente para tempo de exposição de 1h.

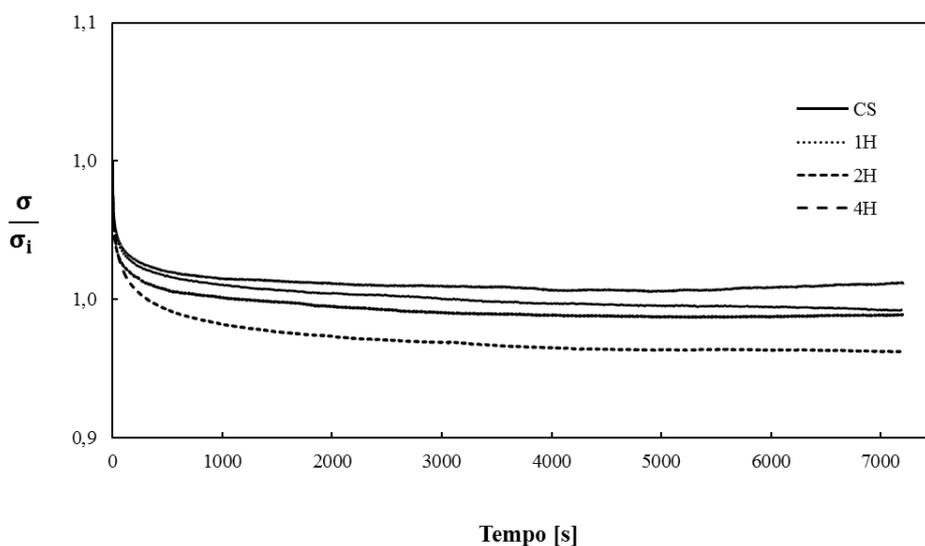


Figura 4.13. Efeito do tempo de exposição para intensidade de 1 A.

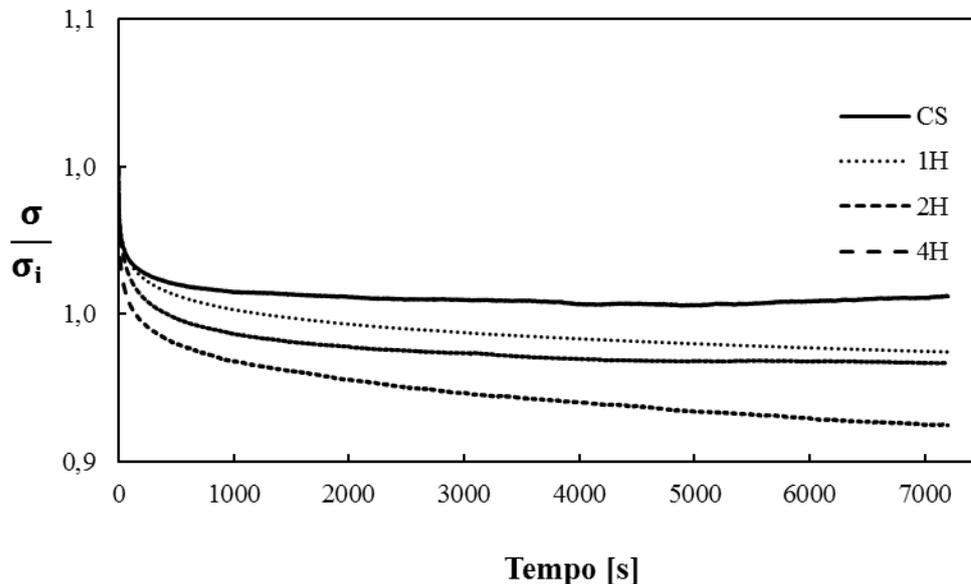


Figura 4.14. Efeito do tempo de exposição para intensidade de 3 A.

#### 4.2.2. Efeito do Tamanho

Para entender o efeito do tamanho é necessário a comparação das amostras com tamanhos diferentes. Uma vez que foram usados valores iniciais diferentes segundo o tamanho dos provetes, é mais perceptível o efeito do tamanho da amostra se a relaxação de tensões for comparada em termos de percentagem.

De acordo com o anteriormente referido, com base nos ensaios de 3PB, as tensões iniciais a usar para os ensaios de SR foram decididas pelo menor valor de tensão de rotura à flexão obtido, sempre no domínio elástico, sendo este em função do tamanho das amostras degradadas.

Para amostras com 100 mm de comprimento, cuja tensão inicial aplicada no ensaio de SR foi de 200 MPa, expostas a uma corrente de 3 A, para 1h e 2h, apresentam relaxação de tensões de 2 % e 6,72 % respetivamente. Comparando estas, com as amostras de 70 mm, que degradadas na mesma condição, apresentam um relaxamento de tensões de 6,76 % e 9,4%. Ou seja, para a relaxação de tensões, a degradação por passagem de corrente elétrica teve um efeito mais acentuado nas amostras de menor dimensão. No entanto, este comportamento não se verifica para as amostras degradadas durante 4h. Para esta situação

de exposição à corrente de 3 A, a de 100 mm de comprimento segue o padrão, apresentando maior relaxação de tensões do que para a mesma situação de 2h. Porém, as amostras de 70 mm apresentam uma relaxação menor que as de 2h, e semelhante às de 1h, para a mesma degradação, Figura 4.15 e Figura 4.16. De forma a tentar perceber o porquê do comportamento das amostras de 70 mm sujeitas à passagem de intensidade de corrente de 3 A durante 4h, seria importante a realização de mais ensaios nestas condições.

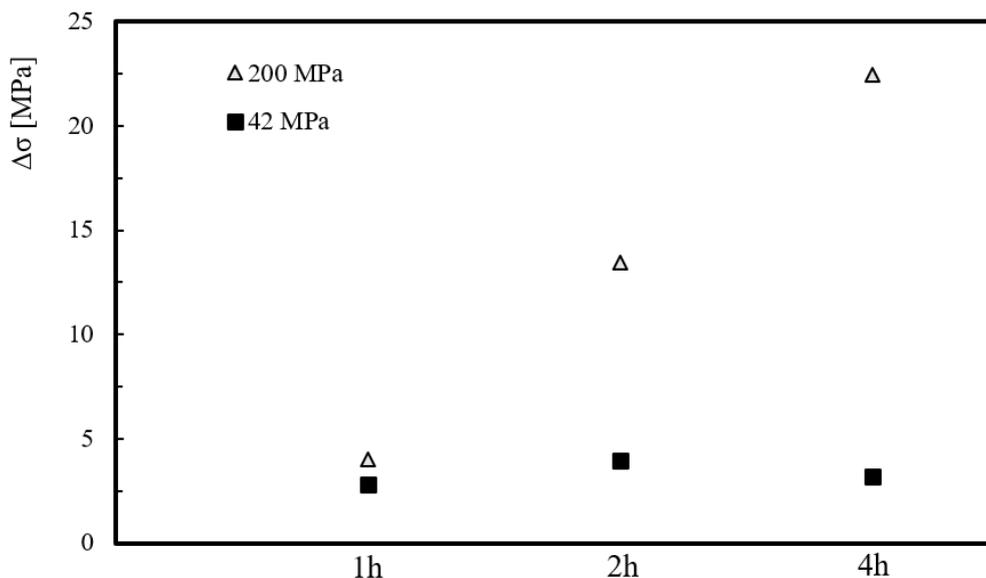


Figura 4.15. Efeito do tamanho da amostra no ensaio de SR.

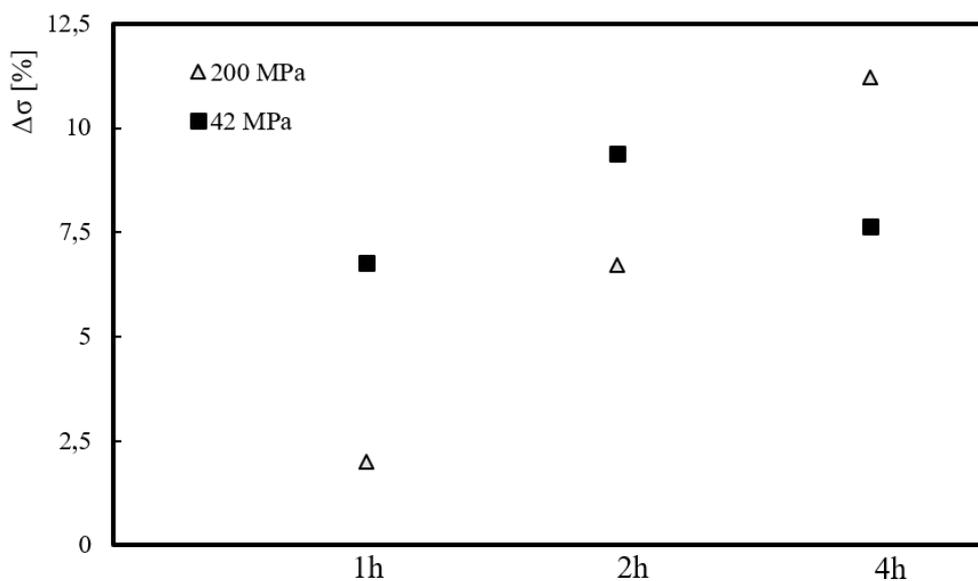


Figura 4.16. Efeito do tamanho da amostra no ensaio de SR (%).

Este facto deve-se à elevada degradação das amostras de 70 mm, após as descargas de 3 A, em que a corrente ao se propagar ao longo do provete através das fibras, possuindo uma menor área, a degradação é mais acentuada, quando comprada com amostras maiores. Para se entender melhor este efeito nas amostras, recorreu-se ao C-Scan.

### 4.3. C-Scan

Numa primeira fase, pensou-se analisar três amostras, antes das descargas, após estas, e após os ensaios. No entanto, como se irá verificar, não foi possível fazê-lo após os ensaios, uma vez que a elevada degradação que se verificou nas amostras, não iria ser distinguida dos danos provocados pelos ensaios.

Nos ensaios de C-Scan realizados a várias amostras, foram obtidas imagens de  $60 \times 20$  [mm<sup>2</sup>] de modo a visualizar-se a zona central das amostras, região onde foi efetuada a descarga eléctrica.

Através da análise de amostras de 70 mm, que iriam ser expostas à corrente eléctrica de intensidade de 3 A, durante 1h (Figura 4.17 a Figura 4.20), foi possível perceber a dimensão da degradação. Comparando a Figura 4.17 e Figura 4.19 que remetem à situação antes das descargas, em que é possível entender a heterogeneidade dos laminados, bem como defeitos contidos nos mesmos, com as duas análises após as descargas, verifica-se o elevado dano derivado à exposição à corrente eléctrica. Este dano, é dado pela inexistência de sinal, que numa situação normal, é recolhido quando deteta as superfícies do provete, e após a degradação, o sinal deixa de captar as mesmas, devido ao dano, aparecendo assim o fundo azul onde se deveriam ver as amostras, Figura 4.18 e Figura 4.20.

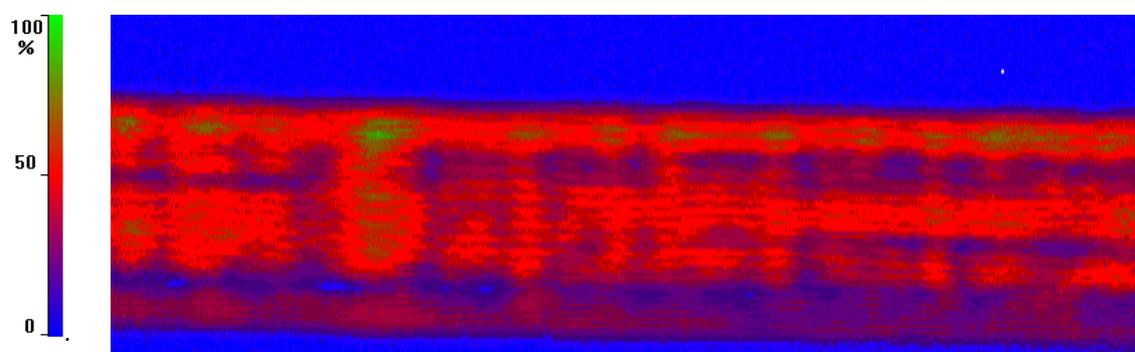
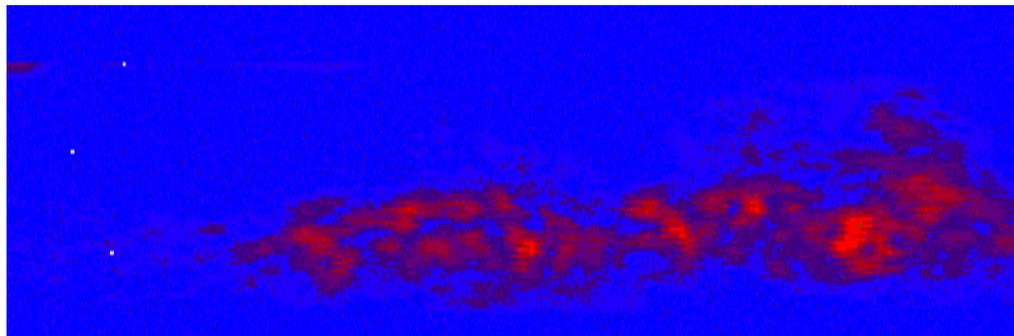
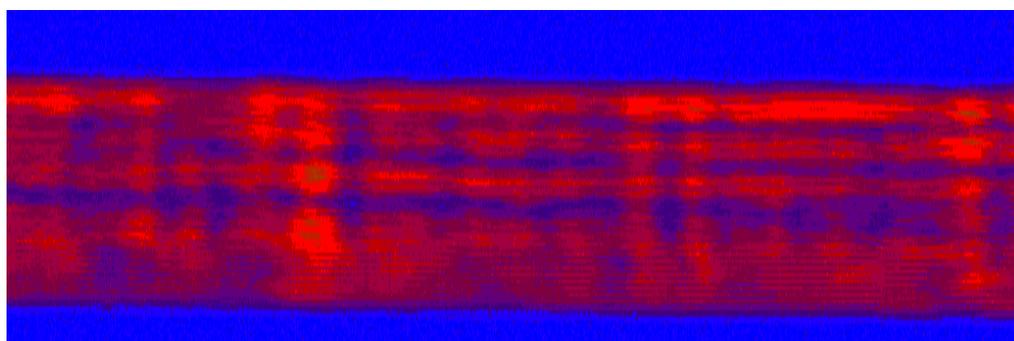


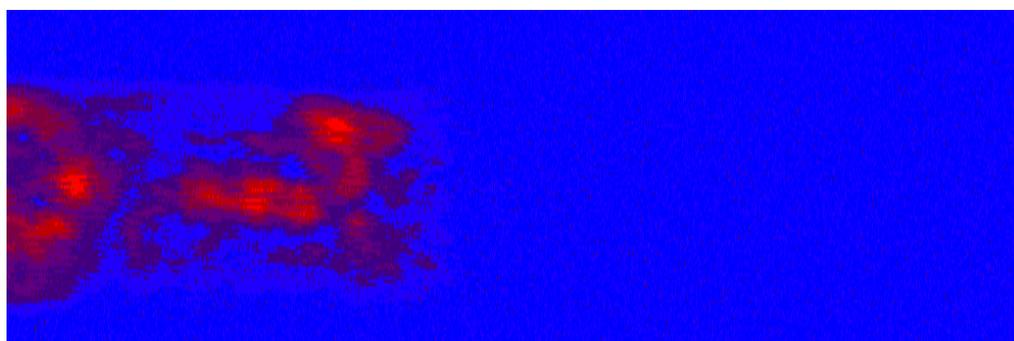
Figura 4.17. Amostra 1 de 70 mm antes de sujeita a descarga e escala C-Scan.



**Figura 4.18.** Amostra 1 de 70 mm após sujeita a descarga.

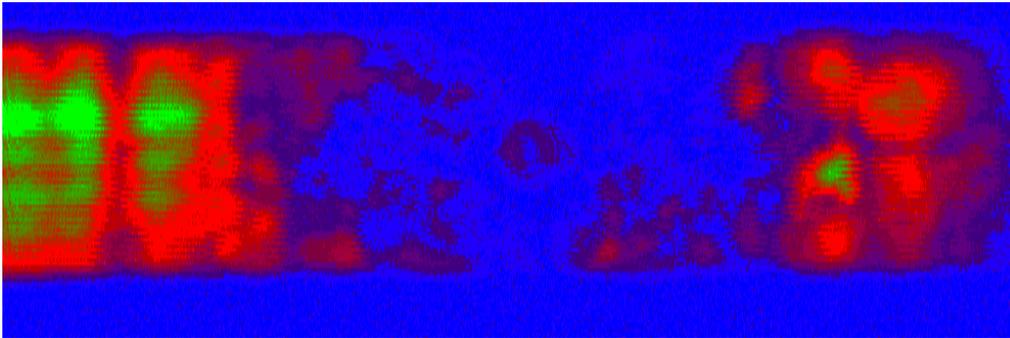


**Figura 4.19.** Amostra 2 de 70 mm antes de sujeita a descarga.

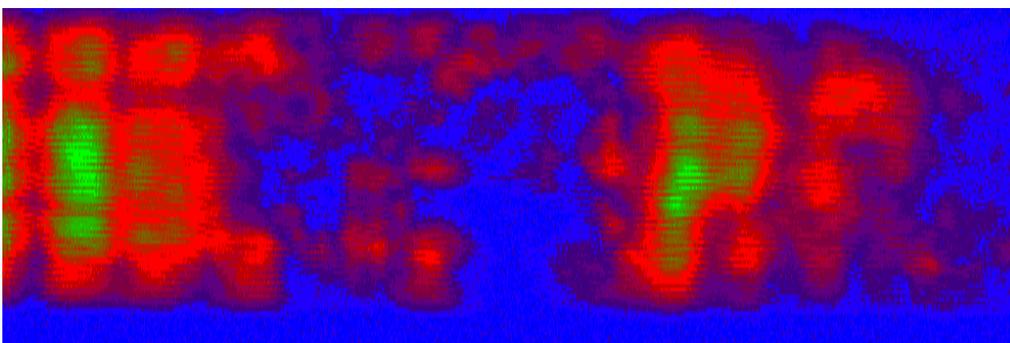


**Figura 4.20.** Amostra 2 de 70 mm após sujeita a descarga.

Para confirmar se este dano se verificava em amostras maiores, de 100 mm, estas foram também analisadas com recurso ao C-Scan, degradadas nas mesmas condições que as anteriores, Figura 4.21 e Figura 4.22.



**Figura 4.21.** Amostra 1 de 100 mm após sujeita a descarga.



**Figura 4.22.** Amostra 2 de 100 mm após sujeita a descarga.

Com esta análise, para esta dimensão foi então possível verificar que a degradação não foi tão acentuada ao longo dos provetes, ainda que na zona central tenha sido bastante elevada.

Estes resultados vão ao encontro do que já havia sido discutido, após os ensaios de 3PB e SR.

#### **4.4. Modelo KWW**

A equação KWW (*Kohlraush-Williams-Watts*) é utilizada para modelar o comportamento de relaxação de tensões (SR) em materiais viscoelásticos. Basicamente consiste numa análise de elementos finitos complexos permitindo, deste modo, ajustar com boa precisão a função KWW à curva experimental dos resultados obtidos. Este modelo serve ainda como previsão de resultados para a relaxação de tensões[24].

Através dos valores experimentais obtidos nos ensaios de SR, tempos e tensões médias, foi possível obter a relação linear na representação gráfica  $f \left[ \ln \left( \ln \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right) \right); \ln(t) \right]$ , onde se retiram os parâmetros  $\beta$  e  $\tau$ . Nas Figura 4.23 a Figura 4.29 são comparadas as curvas

médias da evolução da tensão com o tempo às quais são, também, sobrepostas as curvas de previsão obtidas com o modelo KWW, e o erro entre estas, Tabela 4.3. É possível verificar que este erro é mínimo, uma vez que a equação KWW molde-la perfeitamente o comportamento de relaxação de tensões.

Finalmente, os parâmetros  $\beta$  e  $\tau$  obtidos para as diferentes curvas encontram-se apresentados nas Tabela 4.4 e Tabela 4.5.

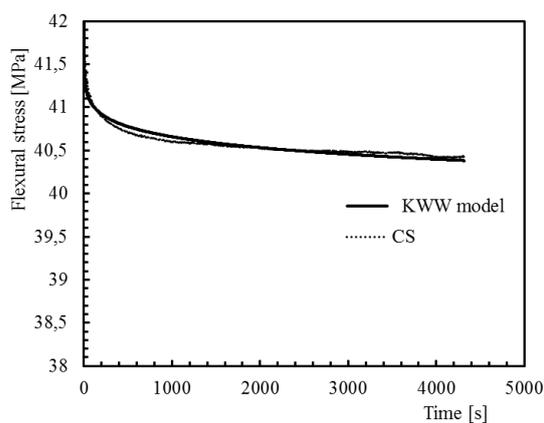


Figura 4.23. Modelo KWW para CS.

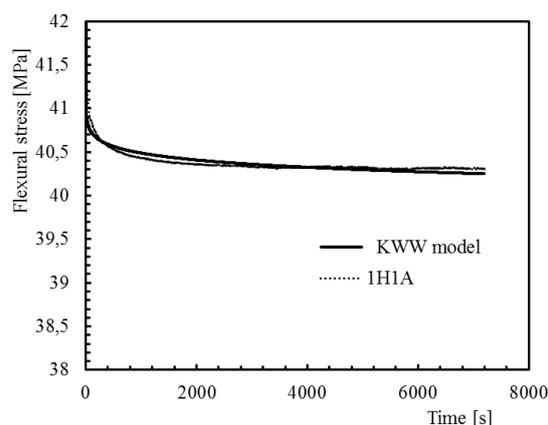


Figura 4.24. Modelo KWW para 1H1A.

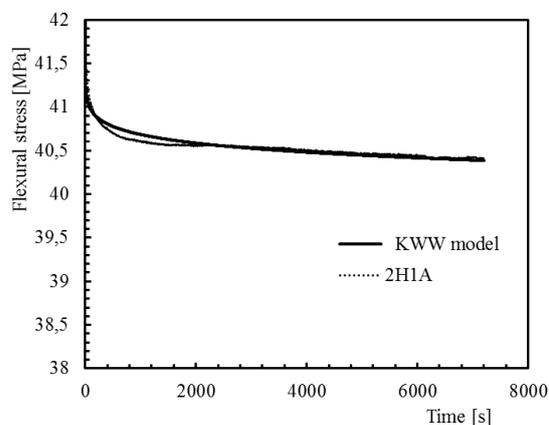


Figura 4.25. Modelo KWW para 2H1A.

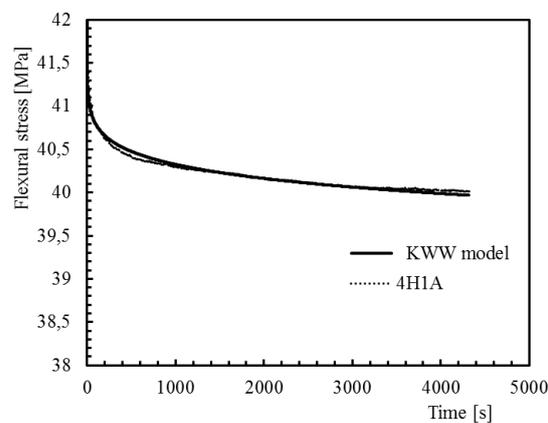


Figura 4.26. Modelo KWW para 4H1A.

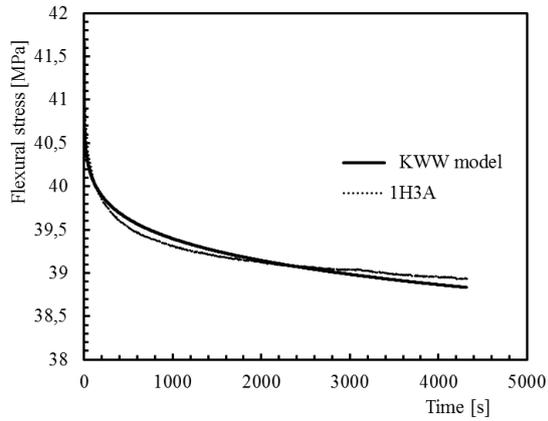


Figura 4.27. Modelo KWW para 1H3A.

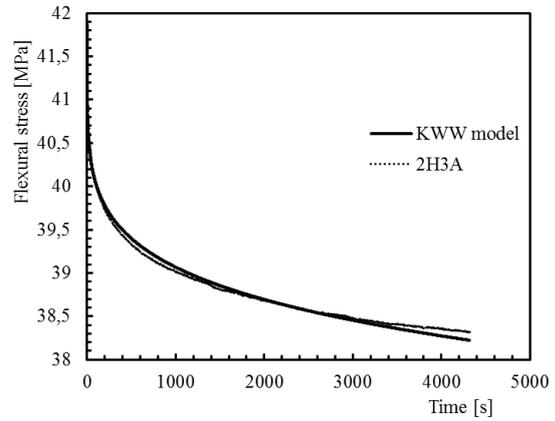


Figura 4.28. Modelo KWW para 2H3A.

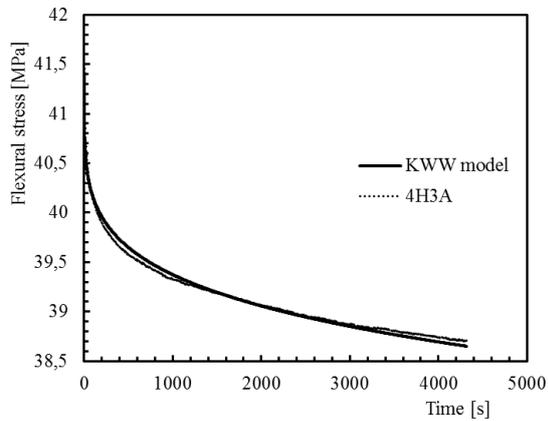


Figura 4.29. Modelo KWW para 4H3A.

Tabela 4.3. Erro entre a Curva Teórica e a Experimental.

Amostras	Erro (%)
CS	0,64
1H1A	0,98
2H1A	0,07
4H1A	0,52
1H3A	1,43
2H3A	3,29
4H3A	2,10

Tabela 4.4. Modelo KWW para 1 A.

Amostras	$\beta$	$\tau$
CS	0,103119	2,27856E+16
1H	0,0714	5,61618E+22
2H	0,097944	8,3439E+17
4H	0,112243	4,00949E+14

Tabela 4.5. Modelo KWW para 3 A.

Amostras	$\beta$	$\tau$
CS	0,103119	2,27856E+16
1H	0,156317	1,00964E+11
2H	0,187133	1568348906
4H	0,213989	1153894917

Finalmente na Figura 4.30 e Figura 4.31, estão representados os parâmetros  $\beta$  e  $\tau$  obtidos para as diferentes intensidades de corrente e tempo de exposição, com o intuito de prever a evolução da tensão com o tempo para um dado material sujeito a uma dada intensidade e tempo de exposição. No entanto, segundo a Figura 4.30, não é possível prever o comportamento do material nesta situação, 1 A, com base nestes parâmetros, devido à relação das linhas de tendência. Para a situação de 3 A, Figura 4.31, o comportamento do material pode ser previsto com base nestes resultados.

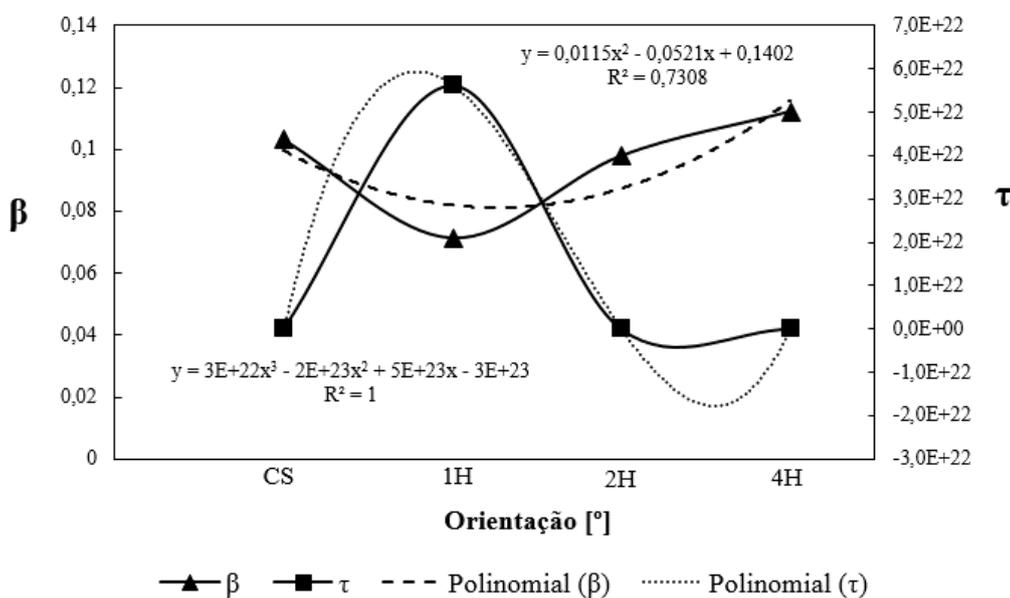


Figura 4.30. Relação Polinomial para 1 A.

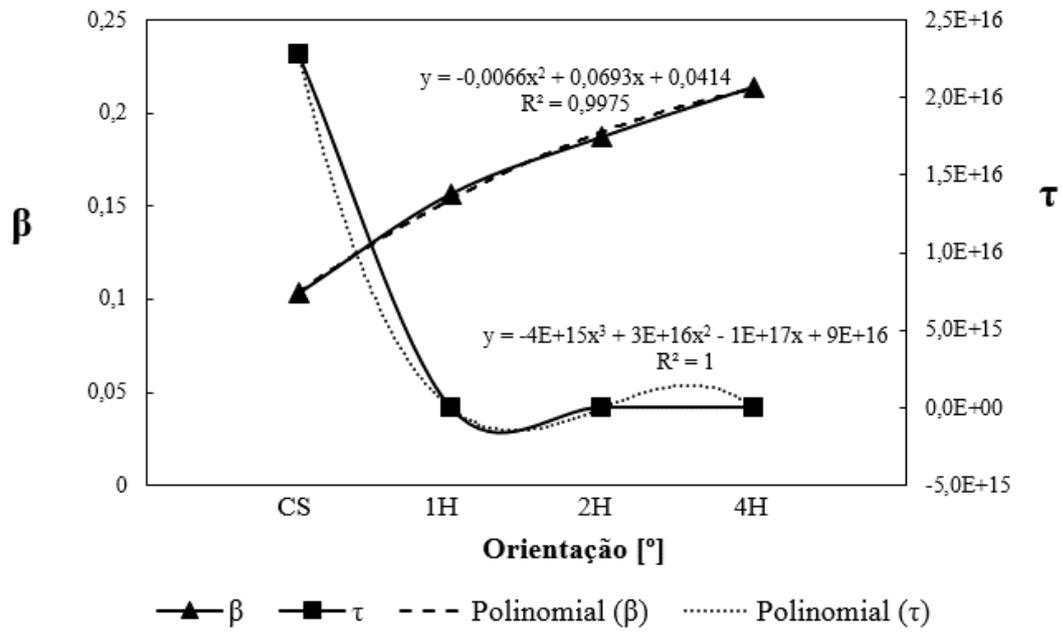


Figura 4.31. Relação Polinomial para 3 A.

## 5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Por último, é apresentado neste capítulo um resumo das principais conclusões e sugeridas algumas propostas para futuros trabalhos para complementar e continuar o estudo do tema.

### 5.1. Conclusões

Com a realização desta dissertação, foi possível concluir que:

1. As descargas elétricas, nas intensidades ensaiadas, afetam a integridade estrutural dos laminados carbono/epóxi, sendo que maior intensidade provoca maior diminuição no valor das propriedades mecânicas do compósito, nomeadamente a tensão de rotura à flexão, e a resposta viscoelástica do compósito através de testes de relaxação de tensões.
2. A degradação provocada pelas descargas elétricas é função da intensidade da corrente, do tempo de exposição e do tamanho das amostras.
3. O valor da tensão de rotura à flexão das amostras diminui para aumentos de intensidade de corrente e tempo de exposição.
4. Para amostras degradadas nas mesmas condições, a tensão de rotura à flexão é superior para amostras de comprimentos superiores.
5. A relaxação de tensões foi também afetada pela degradação. O efeito do aumento da intensidade de corrente e do tempo de exposição provocou uma maior relaxação de tensões.
6. Considerando as mesmas condições de degradação, as amostras com comprimento de 70 mm apresentam relaxação de tensões bastante próximas, enquanto que as amostras com valor de 100 mm para o comprimento se comportam em conformidade com o ponto nº5.

7. Foi possível comprovar a degradação provocada pelas descargas elétricas recorrendo ao uso da técnica C-Scan ultrassónico.
8. O modelo KWW permitiu ajustar os resultados obtidos experimentalmente, bem como criar um modelo de previsão, para as amostras degradadas com descargas de intensidade de corrente de 3 A, ao contrário de 1 A, às quais esse modelo de previsão não foi possível obter.

## **5.2. Propostas para trabalhos futuros**

Com a realização desta dissertação, surgem ideias que futuramente podem ser objeto de estudo:

1. Analisar nas mesmas condições deste estudo, com o mesmo objetivo, laminados de carbono/epóxi com diferentes orientações.
2. Usar amostras com dimensões e intensidades de correntes superiores.
3. Uso de sistemas de refrigeração durante as descargas elétricas.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “Materiais no Desenvolvimento do Produto.” [Online]. Available: [https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779571592703/MateriasCompositos\\_1.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779571592703/MateriasCompositos_1.pdf). [Accessed: 20-May-2018].
- [2] P. H. C. G. Rosa, “Materiais Compósitos,” 2010. [Online]. Available: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAA5-IAH/materiais-compositos>. [Accessed: 21-May-2018].
- [3] A. Silva, “Materiais II - Compósitos.” [Online]. Available: [https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779571592480/Compositos\\_0.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779571592480/Compositos_0.pdf). [Accessed: 20-May-2018].
- [4] R. Zanatta, “Materiais Compósitos na Aviação,” 2015. [Online]. Available: <http://www.aviacao.org/article/materiais-compositos/>. [Accessed: 20-May-2018].
- [5] Wikipedia, “Compósitos - Fase Dispersa,” 2011. [Online]. Available: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Compósito#Fase\\_Dispersa](https://pt.wikipedia.org/wiki/Compósito#Fase_Dispersa). [Accessed: 21-May-2018].
- [6] E. M. Farto, “Estudo da degradação de materiais compósitos sujeitos a descargas elétricas,” Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra, 2014.
- [7] A. M. Moreira, “Materiais de Construção I,” 2008. [Online]. Available: [http://www.estt.ipt.pt/download/disciplina/2932\\_\\_Compositos\\_MC1.pdf](http://www.estt.ipt.pt/download/disciplina/2932__Compositos_MC1.pdf). [Accessed: 23-May-2018].
- [8] J. Weng, W. Wen, and H. Zhang, “Multiaxial fatigue life prediction of composite materials,” *Chinese J. Aeronaut.*, vol. 30, no. 3, pp. 1012–1020, 2017.
- [9] L. Shulin, Y. Junjie, Y. Xueling, C. Fei, and S. Xiaopeng, “Damage analysis for carbon fiber/epoxy composite exposed to simulated lightning current,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 35, no. 15, pp. 1201–1213, 2016.
- [10] P. E. Deierling and O. I. Zhupanska, “Experimental study of high electric current effects in carbon/epoxy composites,” *Compos. Sci. Technol. - Compos. SCI TECHNOL*, vol. 71, pp. 1659–1664, 2011.
- [11] R. L. Sierakowski, I. Y. Telichev, and O. I. Zhupanska, “A Study of Composite Strengthening Through Application of an Electric Field,” no. 47802. pp. 165–174, 2006.
- [12] Y. Hirano, S. Katsumata, Y. Iwahori, and A. Todoroki, “Artificial lightning testing on graphite/epoxy composite laminate,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 41, no. 10, pp. 1461–1470, Oct. 2010.
- [13] S. Wang and D. D. L. Chung, “Electrical behavior of carbon fiber polymer-matrix composites in the through-thickness direction,” *J. Mater. Sci.*, vol. 35, no. 1, pp. 91–100, Jan. 2000.
- [14] G. A. Matzkanin, “Nondestructive Characterization of Heat Damage in Graphite/Epoxy Composites,” in *Nondestructive Characterization of Materials VI*, R. E. Green, K. J. Kozaczek, and C. O. Ruud, Eds. Boston, MA: Springer US, 1994, pp. 517–523.
- [15] A. M. Amaro, P. N. B. Reis, J. B. Santos, M. J. Santos, and M. A. Neto, “Effect of the electric current on the impact fatigue strength of CFRP composites,” *Compos.*

- Struct.*, vol. 182, no. June, pp. 191–198, 2017.
- [16] L. Dinis, “Mecânica não linear,” 2005. [Online]. Available: <https://web.fe.up.pt/~ldinis/viscoelasticidade.pdf>. [Accessed: 16-Aug-2018].
- [17] F. R. Navarro, “Modelos Viscoelásticos Aplicáveis a Materiais Reais: uma Revisão,” *Rev. Eletrônica Mater. e Processos*, vol. 12, no. 1, pp. 1–20, 2017.
- [18] T. Tang and S. D. Felicelli, “Computational evaluation of effective stress relaxation behavior of polymer composites,” *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 90, pp. 76–85, 2015.
- [19] C. Ruchert, “Ensaio Mecânicos dos Materiais.” [Online]. Available: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/241289/mod\\_resource/content/1/Aula\\_8\\_Ensaio\\_Flexao\\_Fluencia\\_Fadiga.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/241289/mod_resource/content/1/Aula_8_Ensaio_Flexao_Fluencia_Fadiga.pdf). [Accessed: 22-Aug-2018].
- [20] M. Caetano, “Relaxação de Tensões e Fluência.” [Online]. Available: [https://ctborracha.com/?page\\_id=1595](https://ctborracha.com/?page_id=1595). [Accessed: 22-Aug-2018].
- [21] N. Obaid, M. T. Kortschot, and M. Sain, “Predicting the stress relaxation behavior of glass-fiber reinforced polypropylene composites,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 161, pp. 85–91, Jun. 2018.
- [22] P. E. Deierling and O. I. Zhupanska, “Experimental study of high electric current effects in carbon/epoxy composites,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 71, no. 14, pp. 1659–1664, Sep. 2011.
- [23] A. E. Zantout and O. I. Zhupanska, “On the electrical resistance of carbon fiber polymer matrix composites,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 41, no. 11, pp. 1719–1727, 2010.
- [24] M. Razavi-Nouri, “Creep and stress relaxation behavior of polypropylene, metallocene-prepared polyethylene and their blends,” *Iran. J. Chemcial Eng.*, vol. 9, no. 1, pp. 60–68, 2012.

