

Miguel Ângelo Correia Barbosa

Efeito da orientação das fibras no comportamento viscoelástico de GFRP sujeitos a ambientes hostis

Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica
na Especialidade de Energia e Ambiente

julho, 2018



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Efeito da orientação das fibras no comportamento viscoelástico de GFRP sujeitos a ambientes hostis

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

Fibre orientation effect on the viscoelastic behavior of GFRP subjected to hostile environments

Autor

Miguel Ângelo Correia Barbosa

Orientadores

Professora Doutora Ana Paula Betencourt Martins Amaro

Professora Doutora Maria Augusta Neto

Júri

Presidente **Professor Doutor Ricardo Nuno Madeira Soares Branco**
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogal **Professor Doutor Paulo Nobre Balbis dos Reis**
Professor Auxiliar da Universidade da Beira Interior

Orientador **Professora Doutora Ana Paula Betencourt Martins**
Amaro
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, julho, 2018

Aos meus pais.

Agradecimentos

Esta dissertação foi realizada num ambiente de trabalho saudável, de dedicação e empenho. Quero deixar o meu especial agradecimento aos meus colegas de trabalho no Laboratório de Mecânica Estrutural e principalmente à minha orientadora, Professora Doutora Ana Paula Amaro por todo o auxílio, disponibilidade, aconselhamento e colaboração ao longo da dissertação. Em segundo lugar, ao Professor Doutor Paulo Nobre Balbis dos Reis pelo esclarecimento, ajuda e tratamento empírico de resultados.

Não academicamente, agradeço a toda a minha família e mais especificamente aos meus pais e irmão pela oportunidade, esforço, compreensão e acompanhamento que me permitiram estudar em Coimbra ao longo destes cinco anos.

Por fim, quero agradecer a todos os meus amigos por todo o contributo e companheirismo.

A todos eles, um sincero obrigado.

Resumo

Os materiais compósitos reforçados com fibras aparecem em grande dimensão em aplicações de engenharia. A escolha destes surge pela possibilidade de se obterem materiais com propriedades mecânicas melhoradas, contribuindo para um aumento na sua integridade estrutural.

A presente dissertação tem como objetivo estudar o efeito da orientação, o efeito da solução e a influência no comportamento viscoelástico do compósito, quando submetido a ambientes hostis, neste caso soluções de ácido clorídrico e de hidróxido de sódio após 30 dias de imersão. Os ambientes hostis promovem a degradação do material, sendo que neste estudo se vai recorrer a ensaios de flexão em três pontos (3PB) e relaxação de tensões (RT) com o intuito de verificar a variação da resistência mecânica do compósito nestes ambientes. Na relaxação de tensões vai ser usado um modelo de ajuste nos resultados experimentais, designado por modelo KWW (Kohlrusch-Williams-Watts). Para entender o impacto da imersão intrinsecamente, os provetes serão também analisados microscopicamente.

Os resultados e consequentes análises são apresentadas em gráficos que descrevem o tipo de solicitação efetuada. Todos os resultados vão ser sujeitos a uma comparação com os provetes não colocados em solução, designadas por provetes de controlo.

Os resultados de 3PB suportam os resultados de RT na maioria dos casos, e o estudo do efeito da orientação demonstrou que a orientação de 0° é a orientação com mais resistência à RT e a orientação de 45° a menos resistente. No efeito da solução, a massa dos provetes aumentou e diminuiu 3-4% depois de imersos em NaOH e HCl, respetivamente. As orientações apresentam diferentes sensibilidades à relaxação de tensões. A orientação de 0° é menos sensível ao RT e as orientações 45° e 60° são as mais afetadas pela solução. O efeito da solução realça o maior impacto nas propriedades mecânicas na imersão em NaOH que em HCl.

Palavras-chave: Ambientes hostis, Comportamento viscoelástico, GFRP, Influência da orientação das fibras, Relaxação de tensões.

Abstract

Fiber-reinforced composite materials appear in large sizes in engineering applications. The choice of these materials arises from the possibility of obtaining materials with improved mechanical properties, contributing to an increase in their structural integrity.

The present dissertation aims to study the effect of orientation, the effect of the solution and the influence on the viscoelastic behavior when subjected to harsh environments of hydrochloric acid and sodium hydroxide after 30 days of immersion of the study material. The materials when subjected to hostile environments promote material degradation and this study will undergo three-point bending (3PB) and stress relaxation (RT) processes in order to verify the impact of mechanical resistance in these environments. In stress relaxation an adjustment model will be used in the experimental results. To understand the impact of immersion intrinsically, samples will also be analyzed microscopically.

The results and consequent analyzes are presented in graphs that describe the type of request made. All results will be subjected to a comparison to the non-solution samples, the control samples.

The results of 3PB support the RT results in most cases, and the study of the effect of the orientation has shown that the orientation of 0° is the orientation with more resistance to stress relaxation and orientation of 45° less resistant. In the effect of the solution, the mass of the test pieces increased and decreased by 3-4% after being immersed in NaOH and HCl, respectively. The orientations present different sensibilities to stress relaxation. The orientation of 0° is less sensitive to stress relaxation and the 45° and 60° orientations are the most affected by the solution. The effect of the solution highlights the greater impact on the mechanical properties of NaOH immersion than HCl.

Keywords: GFRP, Hostil environment, Influence of fiber orientation, Stress relaxation, Viscoelastic behaviour.

ÍNDICE

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xi
Simbologia e Siglas	xiii
Simbologia.....	xiii
Siglas	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. ESTADO DA ARTE	3
2.1. Materiais compósitos	3
2.2. Matriz e Reforço	4
2.2.1. Materiais Compósitos de Matriz Polimérica	6
2.2.2. Reforço de fibra de vidro, carbono e aramida	10
2.3. Comportamento viscoelástico	13
2.3.1. Flexão em três pontos (3PB) e Relaxação de tensões (RT).....	14
2.4. Degradação em ambientes hostis.....	16
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	19
3.1. Identificação dos provetes	19
3.2. Ambiente hostil.....	21
3.2. Ensaio Experimentais.....	22
4. RESULTADOS	27
4.1. Alteração da massa dos provetes	27
4.2. Flexão em três pontos (3PB).....	28
4.3. Relaxação de Tensões (RT)	33
4.3.1. Ensaio de controlo.....	34
4.3.2. Efeito da orientação	36
4.3.3. Efeito da Solução.....	39
4.3.4. Modelo KWW	46
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	53
5.1. Conclusões	53
5.2. Sugestões	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Tipos de materiais compósitos [2].	4
Figura 2.2. Compósitos de matriz polimérica [2].	6
Figura 2.3. Propriedades de termoplásticos [5].	7
Figura 2.4. Uso de termoplásticos específicos [5].	8
Figura 2.5. Comparação entre matriz termoplástica e matriz termoendurecível [5].	10
Figura 2.6. Fibras contínuas. Figura 2.7. Fibras descontínuas.	15
Figura 3.1. Provetes identificados.	20
Figura 3.2. Soluções químicas. (a) HCl; (b) NaOH.	21
Figura 3.3. Máquina de ensaios.	22
Figura 3.4. Spam de 48 mm.	23
Figura 3.5. Tensão limite elástica.	23
Figura 3.6. Média de três dimensões.	24
Figura 3.7. Procedimento a correr para 3PB.	25
Figura 3.8. Procedimento a correr para RT.	25
Figura 3.9. Execução.	26
Figura 4.1. 3PB para os provetes de controlo, considerando as diferentes orientações de corte.	28
Figura 4.2. 3PB para 0°.	29
Figura 4.3. 3PB para 30°.	29
Figura 4.4. 3PB para 45°.	30
Figura 4.5. 3PB para 60°.	30
Figura 4.6. Tendência de 3PB para 0°.	32
Figura 4.7. Tendência de 3PB para 30°.	32
Figura 4.8. Tendência de 3PB para 45°.	32
Figura 4.9. Tendência de 3PB para 60°.	32
Figura 4.10. 3PB CS_0°. Figura 4.11. 3PB HCl_0°.	33
Figura 4.12. 3PB de NaOH_0°.	33
Figura 4.13. RT para CS_0°.	34

Figura 4.14. RT para CS_30°.....	34
Figura 4.15. RT para CS_45°.....	35
Figura 4.16. RT para CS_60°.....	35
Figura 4.17. CS.....	37
Figura 4.18. Efeito da solução para 0°.....	41
Figura 4.19. Efeito da solução para 30°.....	41
Figura 4.20. Efeito da solução para 45°.....	41
Figura 4.21. Efeito da solução para 60°.....	41
Figura 4.22. Tendência para RT_0°/30°/60°.....	44
Figura 4.23. Tendência para RT_45°.....	44
Figura 4.24. RT para NaOH_0°. Figura 4.25. RT NaOH_30°.....	45
Figura 4.26. RT NaOH_45°. Figura 4.27. RT NaOH_60°.....	45
Figura 4.28. Modelo KWW para CS_0°.....	46
Figura 4.29. Modelo KWW para HCl_0°.....	46
Figura 4.30. Modelo KWW para NaOH_0°.....	47
Figura 4.31. Modelo KWW para CS_30°.....	47
Figura 4.32. Modelo KWW para HCl_30°.....	47
Figura 4.33. Modelo KWW para NaOH_30°.....	48
Figura 4.34. Modelo KWW para CS_45°.....	48
Figura 4.35. Modelo KWW para HCl_45°.....	48
Figura 4.36. Modelo KWW para NaOH_45°.....	49
Figura 4.38. Modelo KWW para CS_60°.....	49
Figura 4.39. Modelo KWW para HCl_60°.....	49
Figura 4.39. Modelo KWW para NaOH_60°.....	50
Figura 4.40. Relação Polinomial para CS.	51
Figura 4.41. Relação Polinomial para HCl.	51
Figura 4.42. Relação Polinomial para NaOH.....	52

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Conjugações possíveis de matriz-reforço [1] [4].....	5
Tabela 2.2. Resinas [5].	9
Tabela 2.3. Comparação de fibras.	12
Tabela 3.1. Identificação dos provetes.	20
Tabela 3.2. Condições iniciais e procedimentos.....	25
Tabela 4.1. Variação da massa.	27
Tabela 4.2. Resultados Tensão Média à Flexão de 3PB.....	30
Tabela 4.3. Erros positivos e negativos.	35
Tabela 4.4. Percentagens de RT.	38
Tabela 4.5. Resultados de Feng <i>et al.</i> [16].	39
Tabela 4.6. Relaxação de tensões.	42
Tabela 4.7. Modelo KWW para 0°.	47
Tabela 4.8. Modelo KWW para 30°.	48
Tabela 4.9. Modelo KWW para 45°.	49
Tabela 4.10. Modelo KWW para 60°.	50

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

b – Largura

h – Espessura

I – Momento de Inércia da secção transversal

L – *Span*

P – Força aplicada

σ – Tensão nominal de flexão

ΔP – Intervalo de carga de flexão

Δu – Intervalo de deslocamento de flexão

Siglas

CS – *Control Sample* (Provete de Controlo)

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra

KWW – Maxwell e Kohlrausch-Williams-Watts

RT – Relaxação de Tensões

3PB – *Three Point Bending* (Flexão em três pontos)

1. INTRODUÇÃO

O estudo dos materiais compósitos tem aumentado ao longo dos anos até aos dias de hoje. A dificuldade de encontrar propriedades mecânicas requeridas para certas aplicações nos materiais sugeriu a junção de materiais com características distintas, por forma a se aproveitar as melhores propriedades de cada um dos materiais envolvidos. Assim, a necessidade de utilização de diferentes propriedades leva à combinação de dois ou mais materiais de modo a se atingir as competências desejadas. O material compósito tem uma extensa gama de aplicações com a finalidade de satisfazer inúmeras áreas, nomeadamente indústrias automóvel, naval, aeronáutica e aeroespacial.

No presente estudo, o compósito utilizado baseia-se num material polimérico poliéster reforçado com fibra de vidro, seccionado em quatro orientações distintas. Sendo um material compósito polimérico, apresenta comportamento viscoelástico, o qual será estudado através da realização de ensaios de relaxação de tensões.

Assim, o objetivo principal desta dissertação passa pelo estudo do comportamento da relaxação de tensões em compósitos sujeitos a degradação por ambientes hostis, mais precisamente a uma solução de ácido clorídrico (HCl) e a uma solução alcalina de hidróxido de sódio (NaOH). De seguida recorre-se a um modelo de ajuste de modo a aferir o efeito da relaxação de tensões no material.

O presente trabalho pretende também estudar o efeito da orientação das fibras no comportamento viscoelástico de compósitos de matriz polimérica e fibra de vidro sujeitos, como já referido, a ambientes hostis. Outro objetivo é avaliar se as diferentes orientações conseguem promover diferentes respostas ao tipo de solicitação imposta e ao meio ambiente.

Devido à enorme variedade de aplicação de materiais compósitos, estes ficam sujeitos a ambientes por vezes desconhecidos, sendo determinante conhecer o seu efeito na sua integridade estrutural, daí a importância deste estudo.

Os resultados permitem verificar que existe influência dos meios corrosivos na integridade estrutural dos compósitos, independentemente da solução. A solução alcalina provoca maior redução nas propriedades mecânicas dos compósitos do que a solução ácida.

Em termos de orientação também se constata um efeito da mesma na resposta do compósito à solicitação imposta.

A dissertação está organizada em cinco capítulos principais, começando pelo capítulo da introdução. De seguida, o segundo capítulo, contém um estudo dos materiais compósitos dando relevância ao tipo de compósito específico de trabalho. O terceiro capítulo consiste na descrição do método experimental e todos os assuntos que dão base aos ensaios realizados. No quarto capítulo são apresentados os resultados e discussão quanto à sua normal influência nos provetes, nomeadamente na variação de propriedades, antes e depois, de imersos em solução. No último capítulo são apresentadas as conclusões e indicadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

2. ESTADO DA ARTE

Neste capítulo apresentam-se os conceitos necessários para o leitor compreender o conteúdo do trabalho. Faz-se uma referência aos materiais compósitos e seus constituintes, ao comportamento viscoelástico dos mesmos e aborda-se a degradação por ambientes hostis.

2.1. Materiais compósitos

A utilização de materiais compósitos não é recente. A concepção destes materiais é bastante antiga, existindo referências sobre a utilização de argila reforçada com palha em tijolos no Antigo Egito, que corresponde a um material compósito. A evolução dos compósitos surge na iminência da satisfação das necessidades humanas e contribuição para o desenvolvimento material. Os materiais compósitos assentam em misturas não solúveis de dois ou mais constituintes com diferentes propriedades, composições e estruturas que se combinam, de forma a permitirem a obtenção de um material com propriedades mecânicas que consigam responder às condições de projeto para o qual foi desenvolvido.

O propósito específico dos compósitos resume a combinação dos materiais a executar onde são avaliadas várias propriedades de enorme relevância, como por exemplo [1]:

- resistência à corrosão;
- rigidez específica;
- massa;
- resistência à fadiga;
- expansão térmica;
- propriedades eletromagnéticas;
- condutibilidade térmica;
- comportamento acústico.

Os materiais compósitos são constituídos por matriz e reforço e são normalmente influenciados pelas propriedades mecânicas e fração volumétrica de cada um dos seus

constituintes, distribuição e dispersão da fase dispersa, tamanho, formato e porosidade da carga e adesão interfacial.

Os materiais compósitos dividem-se em quatro grupos principais: compósitos de partículas, de fibras, laminares e naturais (Figura 2.1) [2].

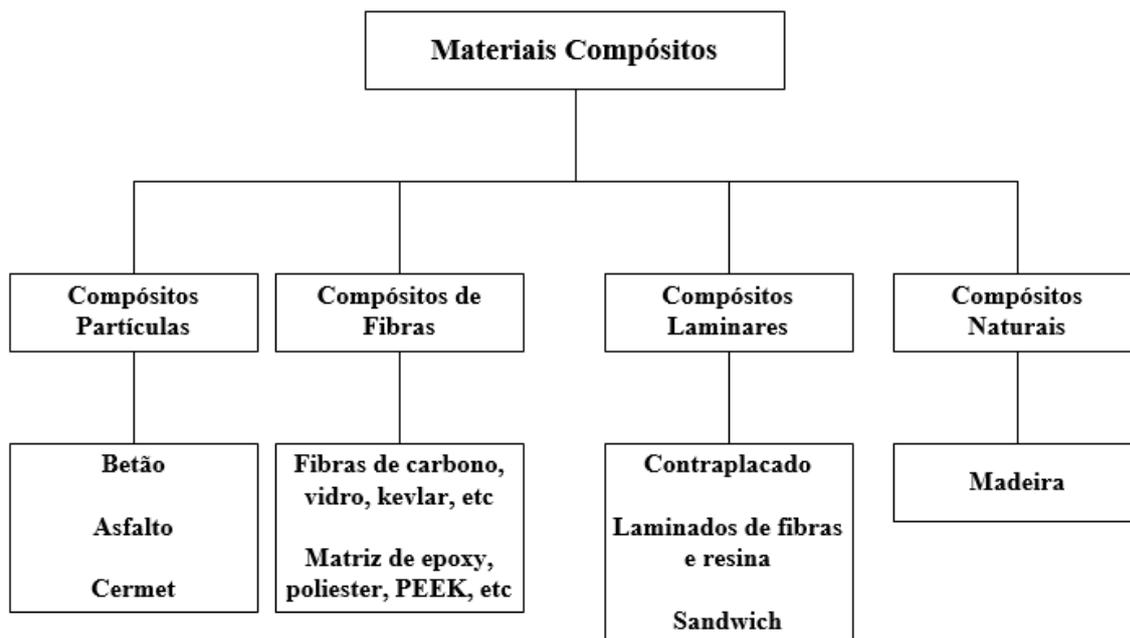


Figura 2.1. Tipos de materiais compósitos [2].

2.2. Matriz e Reforço

De acordo com o anteriormente referido, um material compósito é constituído por duas fases de diferentes propriedades químicas e físicas. São formados por uma fase contínua (matriz) e uma fase dispersa contínua ou não (reforço) [3].

O constituinte do compósito que garante a ligação é chamado de matriz e transmite os esforços mecânicos aos reforços, mantendo-os em posição. A matriz nos compósitos de fibras pode ser um metal, um polímero ou um cerâmico, sendo o metal e o polímero os mais utilizados por terem melhores propriedades de ductilidade [2]. Tem a função de unir as fibras

entre si e é o meio pelo qual a tensão aplicada ao compósito é transmitida para a fibra. Uma outra função da matriz é proteger as fibras do meio exterior, contra danos superficiais possíveis na ocorrência de abrasão mecânica ou reações químicas com o meio ambiente.

Assim, a matriz é responsável pela manutenção das fibras na orientação apropriada, pela proteção contra abrasão e efeitos ambientais e garantir a transferência e distribuição das tensões [4].

Do mesmo modo, o material que garante a resistência é chamado de reforço, e é o elemento que suporta os esforços no compósito (geralmente responsável pelas propriedades mecânicas, como por exemplo a dureza, resistência à tração, tenacidade e rigidez).

Na maioria dos casos, uma tensão aplicada num compósito é suportada pelas fibras e somente uma pequena parte é suportada pela matriz, pelo que o módulo de elasticidade da fibra deve ser muito maior do que o da matriz.

Pelo facto de a matriz ser mais dúctil separa as fibras e previne a propagação de fendas de uma fibra para a outra. Assim, é imprescindível que as forças de ligação entre a fibra e a matriz sejam elevadas, sendo um factor muito importante na seleção de uma combinação matriz-fibra. Na Tabela 2.1 estão as conjugações mais utilizadas de matriz-reforço [1] [4].

Tabela 2.1. Conjugações possíveis de matriz-reforço [1] [4].

Matriz		Reforço	
Orgânica (PMC's- Compósitos de matriz polimérica)	Polímeros Termoplásticos	Mineral	-Fibra de vidro -Fibra de carbono
		Orgânico	-Aramida -Poliamida
	Polímeros Termoendurecíveis	Metálico	- Boro - Alumínio
Metálica (MMC's- Compósitos de matriz metálica)	Ligas leves de alumínio, magnésio, titânio	Mineral	-Carbono -Carboneto de silício
		Metálico	-Boro
		Misto	-Boro revestido com carboneto de silício
Cerâmica (CMC's- Compósitos de matriz cerâmica)		Mineral	Carbonetos
		Metálica	Boro ou Tungsténio

2.2.1. Materiais Compósitos de Matriz Polimérica

Os materiais compósitos de matriz polimérica surgem na indústria, e noutras aplicações, em matrizes termoplásticas e em matrizes termoendurecíveis. Estes compósitos destacam-se pelo seu preço baixo, na maior parte dos casos, e pela ampla variedade de propriedades que é possível obter a partir de formulações destas matrizes e respetivos reforços. Assim, e de modo a diferenciar os tipos de materiais compósitos poliédricos, vão ser apresentadas algumas matrizes e reforços que definem as principais propriedades mecânicas do material. A Figura 2.2. apresenta um fluxograma representativo destes materiais [2].

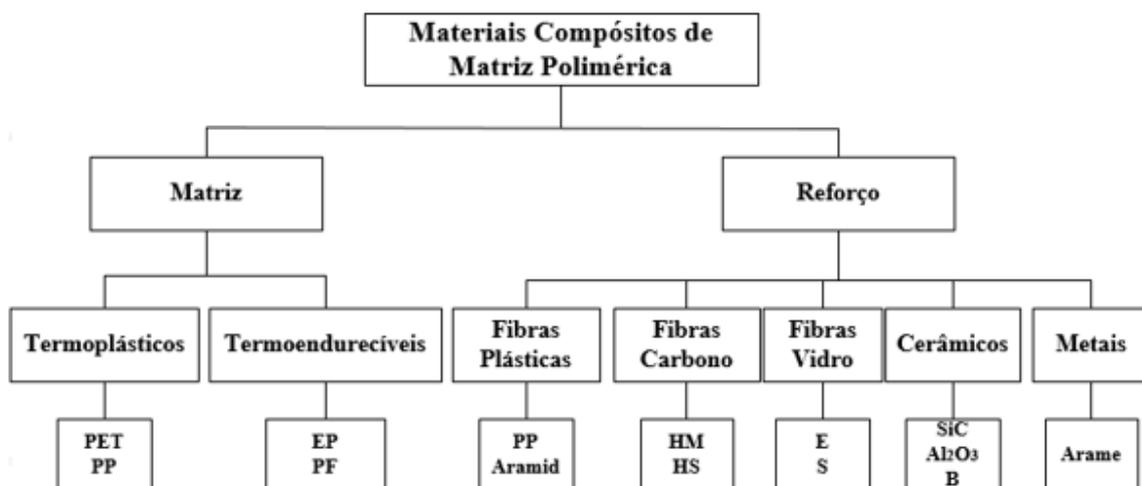


Figura 2.2. Compósitos de matriz polimérica [2].

Os polímeros mais utilizados de matriz termoplástica são os que melhor têm entrado nos mercados comerciais de grande consumo, por apresentarem uma relação “desempenho mecânico/custo” atraente, destacando-se o polipropileno (PP), o poliéster termoplástico (PET), o policarbonato (PC) e a poliamida (PA).

As propriedades térmicas do termoplástico são muitas vezes determinantes para a seleção da matriz a utilizar no pré-impregnado, dada a forte influência que têm, não só no posterior desempenho dos compósitos à temperatura de serviço, mas também, na facilidade com que podem ser processados. Na Figura 2.3. estão apresentadas as propriedades típicas dos termoplásticos mais usados em materiais compósitos [5].

Propriedade	Unidade	Termoplástico					
		ABS	Nylon 66	PEEK	PP	PC	PET
Densidade	-	1,04	1,14	1,3	0,905	1,15	1,36
Calor específico	kJ/kg·K	1,3	1,7	-	2,0	1,2	1,0
Tensão de rotura	MPa	38	70	62	33	65	75
Módulo à flexão	GPa	2,2	2,8	3,8	1,5	2,8	3
Deformação na rotura	%	8	60	4	150	100	70
Preço	-	2,1	3,9	42	1	4,2	3,0
Condutibilidade térmica	W/m·K	0,25	0,24	-	0,20	0,2	0,2
Temperatura de processamento	°C	252	260	385	204	270	260-310
Temperatura de serviço	°C	60-105	65-177	177-315	120	120	80-120

* Preço com base num preço para o PP igual à unidade.

Figura 2.3. Propriedades de termoplásticos [5].

Tipicamente, a PA é o termoplástico mais utilizado nos materiais compósitos, Figura 2.4. Apesar do seu preço ser mais elevado que o do PP e deve-se, sobretudo, à sua aplicação em peças injetadas para um mercado de tão grande consumo, como é o da indústria automóvel. As PA apresentam propriedades mecânicas superiores às do PP, e as características mecânicas da matriz têm tido um contributo muito mais decisivo para o desempenho mecânico nos compósitos reforçados com fibras curtas, do que nos com fibras longas. A adesão do PP às fibras de reforço foi uma razão importante da sua aplicação por garantir uma superior transferência de cargas entre a matriz e o reforço [5].

Com o desenvolvimento de métodos de impregnação mais eficazes e utilização de fibras mais longas, o consumo de PP tem vindo a aumentar nos últimos anos. É um material em que a resistência mecânica, rigidez específica e desempenho, mesmo em condições

sujeitas a variações térmicas, se adequam à grande maioria das aplicações comerciais de grande consumo. Destacam-se as suas excelentes propriedades de resistência à fadiga, isolamento elétrico, resistência química e baixo preço.

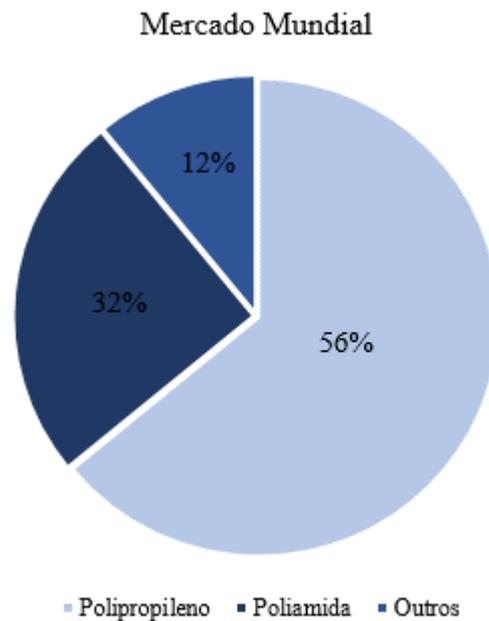


Figura 2.4. Uso de termoplásticos específicos [5].

Os polímeros termoendurecíveis caracterizam-se pela existência de ligações cruzadas entre as suas cadeias macromoleculares. A ligação entre as cadeias do polímero resulta no fenómeno de cura e conduz ao endurecimento irreversível do material. O fenómeno de cura pode ser realizado por aplicação de calor e pressão, ou através da adição de catalisadores químicos. No efeito da cura, as cadeias do polímero ligam-se fortemente, o que confere elevada rigidez à estrutura e torna impossível modificar a forma do produto por reaquecimento. Ou seja, os polímeros termoendurecíveis não podem ser reciclados e apresentam elevada estabilidade térmica e dimensional, baixa densidade, elevada rigidez específica, boas propriedades de isolamento térmico e elétrico. Quando se fala de polímeros termoendurecíveis, quer-se referir aos poliésteres termoendurecíveis, às resinas fenólicas e

às resinas epóxicas. Na Tabela 2.2 estão apresentadas certas vantagens e desvantagens de algumas resinas [4].

Tabela 2.2. Resinas [5].

Resinas	Vantagens	Desvantagens
Poliéster	- Fácil utilização - Baixo custo	- Médias propriedades mecânicas - Trabalho de número limitado
Viviléster	- Grande resistência química e ambiental - Melhores propriedades mecânicas do que os poliésteres	- Pós-Cura requerida para melhores propriedades - Mais caro que os poliésteres - Encolhimento de alta cura
Epóxi	- Boas propriedades mecânicas e térmicas - Tempos de trabalho elevados - Encolhimento de baixa cura	- Mais caro que os vinil ésteres - Mistura complicada - Manuseamento corrosivo

Após a descrição das matrizes termoplásticas e termoendurecíveis é exequível fazer-se uma breve comparação entre ambas.

A partir dos finais do séc. XX foram desenvolvidos novos métodos de produção e transformação de compósitos baseados em matrizes termoplásticas. A inexistência de técnicas que permitissem impregnar fibras longas de reforço com termoplásticos, que conduziam à criação de compósitos com fraca adesão fibra/matriz, ou seja, propriedades mais baixas, era a principal razão de os termoplásticos serem bastante menos utilizados do que os termoendurecíveis em aplicações estruturais [5,6].

Os compósitos de matriz termoplástica têm vindo a comprovar uma tenacidade, resposta ao impacto e dano bastante superiores aos de matriz termoendurecível. Para além de terem uma resistência ao impacto superior, a matriz termoplástica apresenta maior deformação na rotura e ductilidade, ciclos de fabricação mais curtos e maior facilidade de reciclagem, reparação e reprocessamento que a matriz termoendurecível. Para evidenciar as características destas matrizes, a Figura 2.5. [5], apesar de apresentar valores similares na

generalidade, expõe a comparação entre uma matriz termoplástica e uma termoendurecível, carbono/PEEK (compósito de elevado desempenho produzido partir de resina poli éter-éter-cetona) e carbono/epóxido, respetivamente.

Propriedade	Unidade	Carbono PEEK	Carbono Epóxido
Fracção volumica de fibras	%	62	62
Resistência à tracção	GPa	2,44	1,86
Resistência à flexão	GPa	1,50	1,66
Módulo à flexão	GPa	131	131
Resistência à compressão	GPa	1,0	1,3
G_{xz}	Jm^{-2}	3230	260
Resistência ao corte*	MPa	117	110

* Valores obtidos com ensaios SBT-“Short Beam Test”.

Figura 2.5. Comparação entre matriz termoplástica e matriz termoendurecível [5].

2.2.2. Reforço de fibra de vidro, carbono e aramida

Como referido anteriormente, os compósitos de matriz polimérica são classificados quanto ao tipo de matriz e de reforço. A matriz é geralmente constituída por resina epóxida, poliéster e PEEK, e os reforços mais utilizados são vidro, carbono e aramida.

Relativamente aos compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro, também chamados GFRP (“*Glass Fiber Reinforced Polymer*”), o processamento é realizado com especial cuidado quanto à superfície da fibra de vidro, onde pequenos defeitos superficiais afetam negativamente o desempenho da fibra. Estes defeitos podem ocorrer por atrito, abrasão ou contacto com o meio exterior. Geralmente, durante o processo de fabrico, as fibras de vidro são recobertas com uma substância que as protege. No processo de fabrico do compósito esta substância é retirada e substituída por um agente acoplador que promove a forte ligação entre fibra e a matriz.

Os materiais compósitos reforçados com fibra de carbono também chamados de CFRP (“*Carbon Fiber Reinforced Polymer*”) são compósitos avançados que, como o próprio nome indica, utilizam o carbono como fibra que é um material fibroso de alto desempenho. Para a produção de uma fibra de carbono de boa qualidade é necessário um processo de tratamento térmico, condições controladas de tensão, atmosfera e, principalmente, de temperatura.

Os materiais poliméricos reforçados com fibra de aramida apresentam-se como outro tipo de compósito fibroso. A sua grande vantagem comparativamente aos anteriormente referidos é a sua relação resistência-peso. Comercialmente estes compósitos são conhecidos por *Kevlar* e *Nomex* e classificados em vários tipos de acordo com os comportamentos mecânicos. A flexibilidade desta fibra permite que seja fabricada para operações têxteis.

Resumidamente, as fibras utilizadas como reforço apresentam uma vasta gama de aplicabilidade nas mais variadas indústrias. Para melhor se distinguir as suas características e áreas de desempenho, na Tabela 2.3. é ostentada uma comparação entre os tipos de fibras referenciadas onde os compósitos apresentados são de matriz polimérica, só variando o reforço [1, 2, 5 e 6].

Tabela 2.3. Comparação de fibras.

	Fibra de vidro	Fibra de carbono	Fibra Aramida
Características do Compósito	<ul style="list-style-type: none"> - Vidro estirado facilmente; - Alta resistência das fibras estiradas; - Material facilmente disponível; - Fabricado economicamente; - Ampla variedade de técnicas de fabricação; - Compósito formado possui alta resistência específica; - Compósito formado resistente a ambientes corrosivos; - Baixa rigidez; - Alta resistência; - Baixo custo e alta resistência à tração; - Baixo módulo de elasticidade e baixa resistência à fadiga; - Não serve como elemento estrutural em aeronáutica. 	<ul style="list-style-type: none"> - Maior módulo de elasticidade e resistência específicos; - Propriedades mecânicas permanecem a altas temperaturas; - À temperatura ambiente é resistente a meios corrosivos como humidade, solventes, ácidos e bases; - Processos de fabricação economicamente viáveis; - Boa relação de custo-benefício; - Preço elevado; - Baixa massa específica; - Alto módulo de elasticidade (200 a 700 GPa). 	<ul style="list-style-type: none"> - Possuem módulo e limite de resistência a tração longitudinais maiores que os outros materiais poliméricos fibrosos; - Boa tenacidade, resistência ao impacto e são resistentes afluência e a fadiga; - Não são resistentes a ação de ácidos e bases fortes, mas inertes a outros solventes e produtos químicos; - Baixa resistência a compressão.
Aplicações	<ul style="list-style-type: none"> - Carcaças de automóveis, barcos, tubulações de plásticos, recipientes de armazenamento, pisos industriais, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> - Equipamento desportivos, carcaças de motores a jato, vasos de pressão, componentes estruturais de aeronaves, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> - Produtos balísticos (coletes e blindagens a prova de bala), cordas, carcaça de mísseis, substituição do amianto em freios

2.3. Comportamento viscoelástico

Para os materiais com comportamento viscoelástico as suas propriedades mecânicas são dependentes do tempo, isto é, a relação entre a tensão e a deformação variam com o tempo e com a frequência.

Os polímeros usados como constituintes de materiais compósitos, que vão desde amorfos até moderadamente cristalinos, exibem comportamento viscoelástico. Quando é aplicada uma tensão alta, os polímeros apontam também para uma resposta viscoplástica. Os efeitos viscoelásticos e viscoplásticos nos polímeros tornam-se visíveis quando a temperatura se aproxima da temperatura de transição vítrea [7].

Devido ao comportamento viscoelástico da matriz polimérica, os compósitos de matriz polimérica exibem um comportamento viscoelástico no qual a magnitude da tensão e deformação estão dependentes do tempo em contacto com o ambiente. O fenómeno de viscoelasticidade de materiais poliméricos resulta da longa cadeia molecular da matriz polimérica [8].

As propriedades viscoelásticas dos compósitos são complexas. As propriedades da matriz tornam os compósitos baseados em polímeros propícios a fluência e a relaxação de tensões, sendo um repto quando os compósitos são considerados para aplicações de longa duração. A compreensão da viscoelasticidade é necessária para fornecer uma otimização da estrutura do compósito e prever as propriedades a longo prazo [9].

Obaid *et al.* [10] defendem que tem sido um desafio entender o efeito das fibras nas propriedades viscoelásticas em compósitos de fibra curta. Essas propriedades são extremamente importantes nas aplicações de força onde existe potencial para fluência e relaxação de tensões, ou quando os compósitos são expostos a alguma força dinâmica e, conseqüentemente, seja importante ser capaz de se prever a influência do reforço da fibra na viscoelasticidade. Os compósitos viscoelásticos também podem influenciar comportamentos de fadiga e a dependência da temperatura de várias propriedades mecânicas, incluindo a resistência à fluência.

2.3.1. Flexão em três pontos (3PB) e Relaxação de tensões (RT)

O ensaio de flexão consiste na aplicação de uma força numa determinada secção da viga. Existem dois tipos principais de ensaios à flexão, sendo eles a flexão em três pontos e a flexão em quatro pontos. No que se refere à resposta do ensaio de 3PB este depende da geometria de seção transversal. O 3PB é um ensaio bastante utilizado em cerâmicos, polímeros e metais duros pois fornece informações acerca das propriedades mecânicas, tais como, módulo de rotura à flexão, módulo de elasticidade, resiliência e tenacidade, que ajudam a caracterizar o material.

A relaxação de tensões é uma forma de avaliar a viscoelasticidade de um polímero. Exprime-se em percentagem da tensão inicial em relação à tensão final, e diz-se que há relaxamento da tensão quando uma tensão é aplicada no provete com uma deformação constante, diminuindo com o tempo. Dá-se então uma redução da tensão em função do tempo. O uso de ensaios de flexão é frequentemente utilizado na avaliação da RT. Zufall e Kusy [11] recorreram a testes de flexão para avaliar a RT em arcos ortodônticos de material compósito. De acordo com Banna *et al.* [12], estes métodos são selecionados por apresentarem elevada sensibilidade às condições de exposição, neste caso a ambientes hostis.

A RT é influenciada pela relação da transferência da tensão aplicada com o tempo na interface matriz-fibra. O efeito das fibras na viscosidade é tipicamente atribuído a mudanças nas ligações covalentes na interface matriz-fibra. É uma maneira direta de caracterizar a viscoelasticidade de um compósito [9].

A adição de fibras curtas num compósito é utilizada com a finalidade de diminuir a taxa da relaxação de tensões. É um tópico interessante uma vez que as fibras não exibem dependência do tempo no comportamento. Mas, no entanto, parecem fazê-lo quando embebidas numa matriz viscoelástica. Obaid *et al.* [9] verificaram que as ligações covalentes interfaciais entre as duas fases inibem a mobilidade do polímero e, portanto, reduzem a tensão da relaxação.

Obaid *et al.* [10] realçam que a estrutura de um compósito pode ser reforçada com fibras contínuas e descontínuas (Figuras 2.6. e 2.7.). Quando um compósito de fibras contínuas é pressionado por uma tensão, a fibra e a matriz são igualmente deformadas. Contudo, num compósito de fibra curta, a tensão requerida para deformar as fibras é

transferida através de camada interfacial, e acaba com a fibra sendo inteiramente carregada. Observando a longo prazo, verifica-se que o maior tamanho da fibra reduz mais eficientemente a tensão de relaxação e por isso, as fibras curtas aceleram a resposta da relaxação.

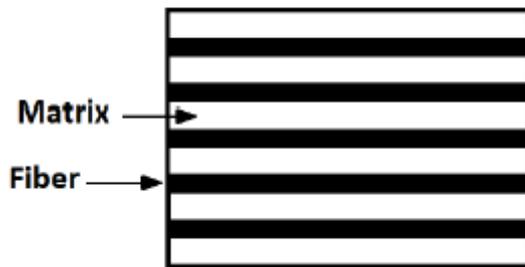


Figura 2.6. Fibras contínuas.

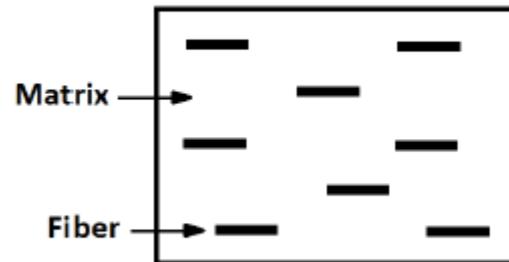


Figura 2.7. Fibras descontínuas.

Alguns investigadores propuseram explicações mecânicas, na qual as fibras afetam a estrutura da matriz polimérica próximo da interface e, conseqüentemente, modificam a sua relaxação de tensões. Blackley e Pike [13] observaram que a RT foi afetada pela adição de ligações covalentes entre as fibras e a matriz, tendo sido a rutura dessas ligações durante a RT que causou a resposta acelerada da relaxação de tensões. Bhagawan *et al.* [14] e Flink *et al.* [15] mostraram com os seus estudos que a adição de curtas fibras não aumenta a relaxação de tensões comprovando o efeito oposto de Blackley e Pike [13].

Um objetivo do presente estudo é comparar a RT obtida experimentalmente com um modelo analítico simplificado. O bom ajuste experimental com as previsões do modelo evidencia que os pressupostos subjacentes do modelo analítico e do procedimento experimental estão em consonância. De acordo com ambos os estudos (analítico e experimental) pode-se explicar a influência das fibras no comportamento de RT do compósito. Assim, o modelo foi uma adequada ferramenta para determinar o comportamento da RT nas fibras de materiais compósitos.

2.4. Degradação em ambientes hostis

Nos últimos anos, tem havido um grande crescimento no uso do material compósito reforçado com fibra em aplicações de engenharia. Uma clara indicação da sua continuidade surge na fabricação de componentes de materiais compósitos para aplicabilidade em ambientes corrosivos, em alternativa aos aços inoxidáveis e revestidos [16]. Os materiais compósitos começaram também a ser bastante utilizados nas indústrias petroquímicas, ficando, deste modo, sujeitos aos ambientes atrás referidos.

Stamenovic *et al.* [17] realizaram um estudo em que avaliaram o efeito de soluções alcalinas e ácidas nas propriedades de tração de materiais compósitos de poliéster reforçado com fibra de vidro, tendo concluído que a solução alcalina diminui a resistência à tração e a solução ácida aumenta as propriedades de tração, sendo este fenómeno mais relevante para pH menores. Para ambas as soluções, as mudanças nas propriedades de tração são proporcionais ao número de dias de imersão.

Nos estudos realizados por [17, 18] foi possível atentar-se que, independentemente da solução, a resistência à flexão e o módulo de elasticidade diminuem com o tempo de exposição. Por outro lado, a solução alcalina mostrou ser mais agressiva do que a solução ácida, afetando de modo mais significativo as propriedades de flexão. A diminuição observada nas propriedades de flexão foi explicada pela degradação da interface matriz-fibra e pelo módulo de elasticidade da matriz. Esta propriedade é bastante afetada quando as matrizes poliméricas são expostas a soluções agressivas.

Segundo Amaro *et al.* [18] a resistência à flexão, o módulo de resistência à flexão e a resistência ao impacto diminuem com o tempo de exposição, independentemente da solução (HCl e NaOH) para GFRP. O ambiente alcalino é mais agressivo do que o ácido, promovendo menores propriedades como a rugosidade, que aumenta com o tempo de exposição, sendo maior para os provetes imersos em NaOH. Num outro trabalho, Reis *et al.* [19] estudaram a resistência ao impacto de compósitos GFRP em condições extremas tendo concluído que a quantidade de misturas (HCl e NaOH) absorvida é determinante na degradação após impacto. Observaram, ainda, que a magnitude de dano inicial tem uma influência significativa na resistência ao impacto. Por outro lado, Banna *et al.* [12] concluíram que a solução alcalina diminui a resistência à tração e esta tendência aumenta

com o valor de pH. Este estudo pode ser sustentado por um outro realizado por Stamenovic *et al.* [17] que confirmaram que a solução alcalina, através de microfissuras e outros danos que existiam após o encolhimento do material, tem influência de forma mais significativa na conexão fibra-matriz espalhando e enfraquecendo diretamente a capacidade de carga do material.

Feng *et al.* [16] apoiando os estudos anteriores realçaram a mudança na aparência, onde a resina da superfície seria gradualmente dissolvida na solução alcalina. Na transição de ácido sulfúrico, pH=5 e T=60°C, para T=60°C e concentração de 30 %, os provetes de GFRP mudaram drasticamente, observando uma diminuição da dureza, na resistência e no módulo à flexão, as quais foram muito mais pronunciadas. Para 90 dias de imersão aos provetes perderam toda a resina de superfície e a fibra ficou claramente visível.

A queda nas propriedades mecânicas deve-se à absorção, penetração e reação que ocorre entre as soluções e os constituintes da composição (matriz e fibras). Em termos da matriz a solução penetra na resina e separa as microfissuras. A degradação da interface fibra/matriz é causada pela desidratação da matriz e penetração das soluções nas microfissuras [20].

A degradação em compósitos de matrizes termoendurecíveis observa-se em dois estágios. No primeiro estágio a resina é atacada pela combinação da ação da difusão da água e a presença de iões de hidrogénio (H⁺). No segundo estágio a fibra é atacada e a fissuras aparecem na superfície da fibra. Isto afeta significativamente a composição da resistência a cargas [21].

Os principais modos de dano mecânico em compósitos poliméricos depara-se com fissuramento da matriz, quebra da fibra, separação fibra-matriz e delaminação. As fissuras da fibra são mais comuns nos provetes em solução ácida e, por outro lado, o fissuramento da matriz, quebra da fibra e delaminação são mais observadas na imersão em solução alcalina [22].

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para o procedimento experimental foram usadas placas de matriz termoplástica reforçada com fibras de vidro contínuas, com a designação de *Bond Laminates, Tepex*. Estas foram seccionadas de forma a se obter os provetes com as dimensões necessárias ao estudo. Foram divididas em 72 provetes, tendo em conta quatro orientações de corte. Metade dos provetes foram utilizados para o processo de flexão em três pontos (3PB) e outra metade para a relaxação de tensões (RT).

3.1. Identificação dos provetes

Uma das dificuldades no corte da placa em provetes com as dimensões adequadas para os ensaios passou pela sua orientação. O objetivo é que os provetes fossem seccionados com diferentes orientações, 0°; 30°; 45° e 60°, em relação à direção das fibras. Todos os provetes possuem dimensões finais de 60x10x3 [mm].

A existência de um grande número de provetes obrigou a uma boa identificação dos mesmos. Era fundamental, pelo facto de serem imersos em diferentes soluções, que estivessem devidamente nomeados.

Assim, os provetes foram numericamente identificados com a orientação e com um índice para não ocorrerem erros de imersão e do tipo solicitação correspondentes. Deste modo, para uma melhor compreensão está explícita uma representação esquemática, Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Identificação dos provetes.

Orientação de Corte: 0°, 30°, 45°, 60°	3PB	3 de controlo [1,2,3]
		3 imersos em HCl [4,5,6]
		3 imersos em NaOH [7,8,9]
	RT	3 de controlo [10,11,12]
		3 imersos em HCl [13,14,15]
		3 imersos em NaOH [16,17,18]

Um provete não imerso de orientação ao corte de 0° e solicitado à flexão em três pontos pode assumir, de acordo com o esquema, três identificações possíveis: “0_1”, “0_2” ou “0_3”. No caso de um dos provetes de 60° imerso em HCl ser solicitado à relaxação de tensões poderá ser identificado por: “60_13”, “60_14” ou “60_15”.

Este raciocínio foi utilizado para todos os provetes e assim ficaram todos eles menos propícios ao erro na sua identificação. Na Figura 3.1. estão identificados os 72 provetes utilizados neste estudo.

**Figura 3.1.** Provetes identificados.

3.2. Ambiente hostil

Para a imersão dos provetes nos ambientes hostis disponibilizaram-se dois recipientes com as soluções pretendidas de ácido clorídrico (HCl) e de hidróxido de sódio (NaOH). Foram colocadas dentro dos recipientes todos os provetes para serem sujeitos à ação das soluções. Os provetes estiveram imersos durante 30 dias. A massa de todos os provetes foi avaliada antes e após imersão, de modo a se observar se ocorria ganho ou perda de massa durante o período de imersão. Esta avaliação foi feita com o auxílio da balança digital da marca AND modelo GH-202, que efetua medições com precisão até à décima de micrograma.

Ambas as soluções foram preparadas com uma relação massa/volume de 20%, Figura 3.2. A solução ácida e solução alcalina possuem 1,5 e 13 de pH, respetivamente. Esta percentagem tem um significado químico onde numa solução de 100 ml existe 20g de soluto (NaOH/HCl) e como solvente a água.

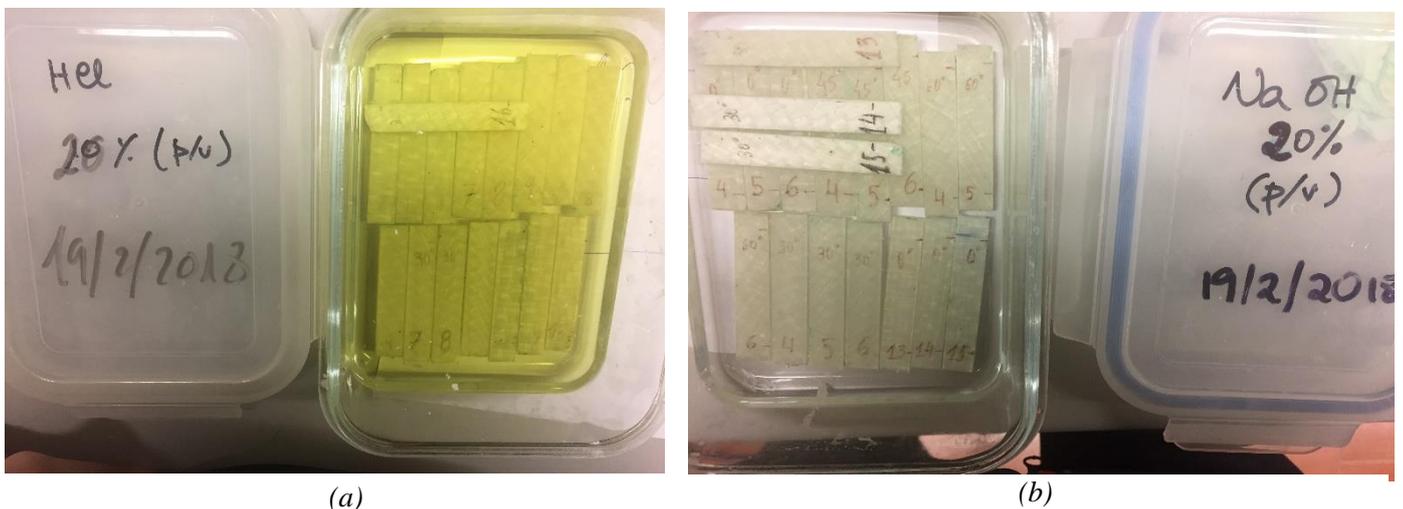


Figura 3.2. Soluções químicas. (a) HCl; (b) NaOH.

3.2 Ensaios Experimentais

Os ensaios de 3PB foram realizados de acordo com a norma ASTM D790-2 e os de RT de acordo com a norma E 328-02. O equipamento utilizado foi a máquina universal Shimadzu AG-10, Figura 3.3, uma ferramenta de alto nível tecnológico que incorpora precisão, eletrônica, controlo, ótica, sensores e processamento de informação, equipada com uma célula de carga de 5 kN, associada ao software *Trapezium X*, Figura 3.3. Usou-se uma velocidade de avanço de 3 mm/min. De acordo com a norma usou-se um *spam* de 48 mm, que corresponde a pelo menos 16 vezes a espessura dos provetes, Figura 3.4.



Figura 3.3. Máquina de ensaios.

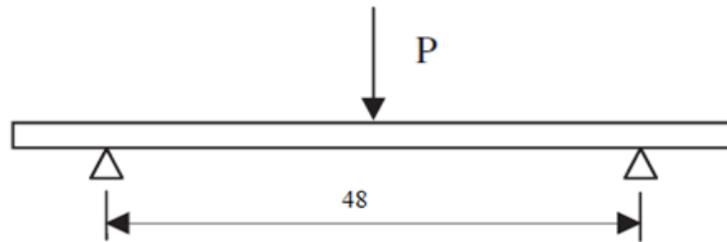


Figura 3.4. Spam de 48 mm.

Os provetes de controlo das várias orientações foram submetidos aos ensaios no decorrer do tempo de imersão dos restantes provetes colocados nas soluções. Isto é, não ocorreu uma ordem específica na solicitação dos provetes de controlo, uma vez que não existiu preocupação em respeitar os tempos de imersão. Uma preocupação procedimental referente aos provetes de controlo surge na pertinência de acabar as solicitações destes provetes próximo do começo dos ensaios dos provetes imersos. Os provetes imersos quando retirados da solução foram pesados e solicitados no próprio dia.

Uma outra demanda experimental acontece pela realização de todos os ensaios de 3PB, e só após estes terminados serem realizados os ensaios de RT. Tal facto é explicado pela simples razão de que a RT é o alvo prioritário na análise da integridade dos provetes. Assim, é necessário ter a realização de todos os ensaios 3PB para se conhecer a tensão correspondente ao regime elástico da curva. Deste modo, garantia-se que se iam realizar os ensaios de RT com valores de tensão limite da zona elástica, Figura 3.5.

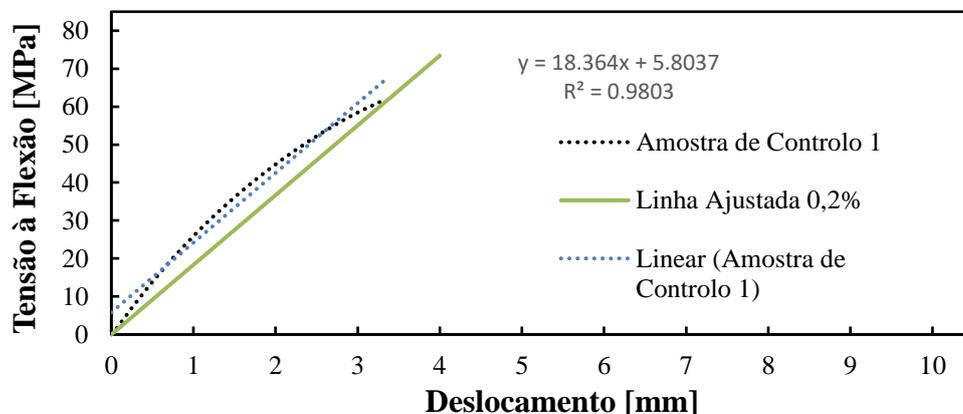


Figura 3.5. Tensão limite elástica

A resistência à flexão foi considerada como sendo a tensão nominal na seção central do provete utilizando o valor de força máxima. A tensão nominal de flexão foi calculada de acordo com a equação (1):

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh} \quad (1)$$

sendo P a força aplicada, L o *span*, b a largura e h a espessura do provete. O módulo de rigidez foi calculado pela relação de vigas de flexão elásticas lineares, equação (2):

$$E = \frac{\Delta P L^3}{48 \Delta u I} \quad (2)$$

onde I representa o momento de inércia da seção transversal do provete e ΔP e Δu são, respetivamente, o intervalo de carga e de deslocamento de flexão a meio do provete.

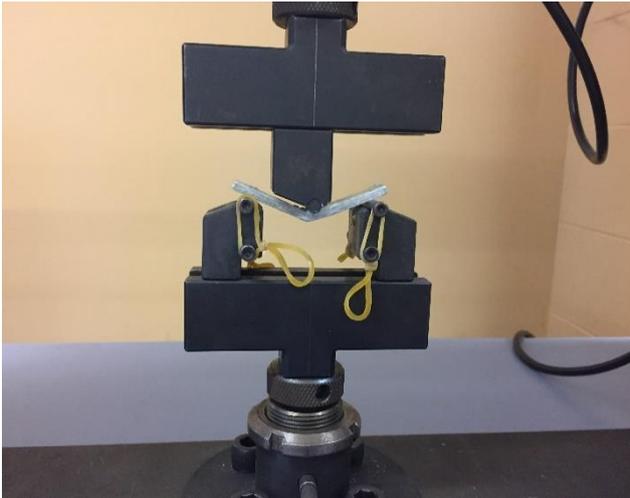
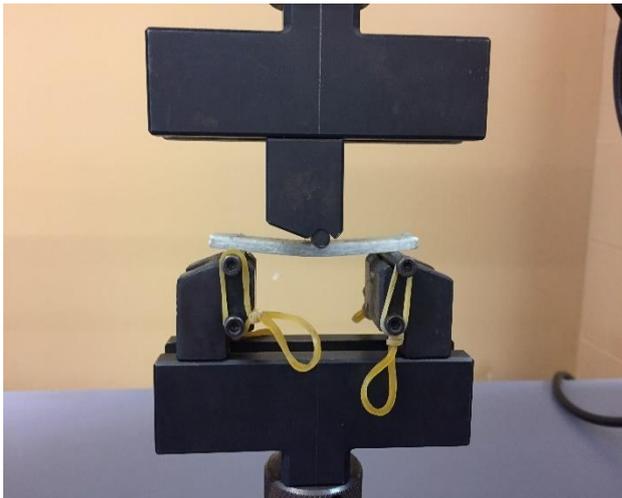
É de salientar que todos os cálculos correspondentes à utilização destas fórmulas foram realizados pelo software *Trapezium X*. Foi necessária alguma certeza na inserção das medidas dos provetes. As medidas inseridas no programa foram calculadas segundo uma média de três medidas, demonstradas esquematicamente na Figura 3.6.



Figura 3.6. Média de três dimensões.

Segundo estas três dimensões foi calculada a média respetiva. A média calculada foi a dimensão que entrou como dado principal característico do provete. Nas solicitações de 3PB e RT foram estipuladas as condições iniciais e procedimentos, Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Condições iniciais e procedimentos.

3 PB	RT
Condições nominais	
<ul style="list-style-type: none"> • Velocidade de 3 mm/min 	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidade de 3 mm/min • Tensão Inicial de 30 MPa • Tempo de 7200 segundos (2 horas)
Procedimentos Experimentais	
	
<p>Figura 3.7. Procedimento a correr para 3PB.</p>	<p>Figura 3.8. Procedimento a correr para RT.</p>

Após cada ensaio experimental, o software criou um ficheiro *Excel* com os dados resultantes da solicitação. Partindo destes dados iniciais foi necessário formatá-los de forma a representá-los graficamente na forma pretendida. Em conta de formatação, foi utilizado praticamente o mesmo tipo de formato numérico e de gamas de abcissas e ordenadas para uma comparação mais fácil. A execução experimental está mostrada na Figura 3.9.



Figura 3.9. Execução.

4. RESULTADOS

Os resultados estão divididos em três partes ilustrando as alterações da massa dos provetes, 3PB e RT. As partes de 3PB e RT mostram inicialmente os resultados dos provetes de controlo que são comparados com os valores avaliados dos provetes imersos. Todos os resultados são resumidos em gráficos característicos de cada tipo de solicitação. Estão também explícitos os resultados do efeito da orientação e da solução na RT.

4.1. Alteração da massa dos provetes

Tendo em conta a massa dos provetes, antes e depois dos 30 dias de imersão, observaram-se variações significativas. A contribuição de cada solução no aumento ou diminuição da massa teve impactos diferentes. O facto da utilização de ambientes hostis totalmente distintos na degradação destes provetes implicou alterações percentuais. Os provetes imersos na solução de NaOH e HCl obtiveram um ganho e uma perda de aproximadamente 3-4%, respetivamente. Na Figura 4.1. estão apresentadas as variações de massa observadas para os provetes de 60° que são representativas dos restantes provetes com outras orientações.

Tabela 4.1. Variação da massa.

Solução	Provetes	Massa Inicial [g]	Massa Final [g]	Varição [%]
NaOH	60_4	3,1622	3,2596	+3,08
	60_5	3,1885	3,2913	+3,22
	60_6	3,0685	3,1690	+3,28
HCl	60_7	3,1772	3,0571	-3,78
	60_8	3,0875	2,9768	-3,58
	60_9	3,1258	3,0105	-3,68

4.2. Flexão em três pontos (3PB)

Como já foi referido anteriormente, os ensaios de 3PB são uma referência para os ensaios de RT. Através dos dados obtidos destes ensaios é possível elaborar um gráfico tensão-deslocamento, onde se consegue visualizar a parte elástica da curva. Algumas curvas têm zonas que decrescem acentuadamente, sobretudo no final. Tal facto pode ser justificado pelo início da rutura do provete.

Com base nas informações relativamente ao processo, foram obtidos os seguintes resultados para os provetes de controlo (CS), Figura 4.1:

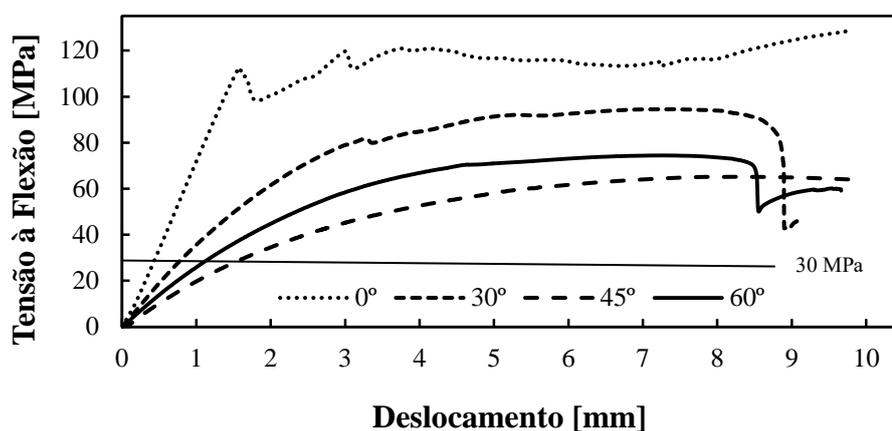


Figura 4.1. 3PB para os provetes de controlo, considerando as diferentes orientações de corte.

Empiricamente, pode-se facilmente observar dois tipos de curvas descritivas: a curva do provete de 0° (“Provete 0”) e o conjunto das três curvas de 30°, 45° e 60° graus (“Provete 30”, “Provete 45”, “Provete 60”). A curva “Provete 0” descreve inicialmente um comportamento tipicamente frágil até ao do seu limite de elasticidade. Após esse ponto descreve um comportamento semelhante às restantes curvas. Relativamente às restantes curvas, todas elas descrevem um comportamento mais dúctil comparativamente ao “Provete 0” que apresenta maior resistência mecânica, por a curva apresentar um declive maior.

De acordo com a informação obtida, pode-se constatar que os provetes de controlo de 0°, 30°, 60° e 45° possuem módulo de elasticidade de grandeza decrescente, ou seja, provetes de 0° apresentam maior módulo de elasticidade e os provetes de 45° menor módulo de elasticidade. Por outro lado, os provetes de 30° e 60° parecem apresentar fratura no final, devido à curva exibir um ressalto no fim. Esta comparação pode ser realizada porque os provetes apresentam todas as mesmas dimensões.

Apesar da existência de provetes de corte com uma orientação mais pronunciada, tal como o provete de 60°, este possui, por análise da inclinação da curva, um maior módulo de elasticidade comparativamente ao provete de 45°.

A dar continuidade à análise de 3PB, serão a seguir apresentados os resultados comparativos entre os provetes de controlo e os provetes imersos, Figuras 4.2 a 4.5 e Tabela 4.2.

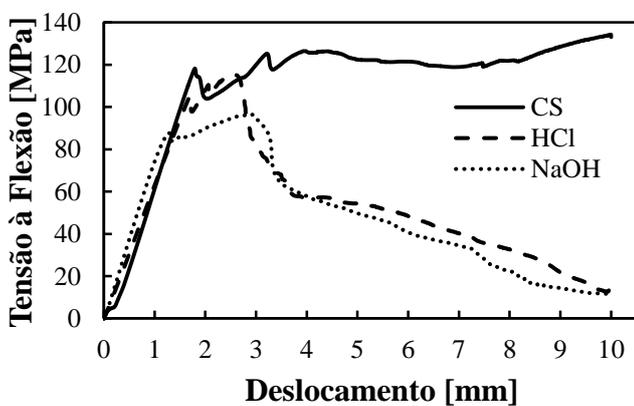


Figura 4.2. 3PB para 0°.

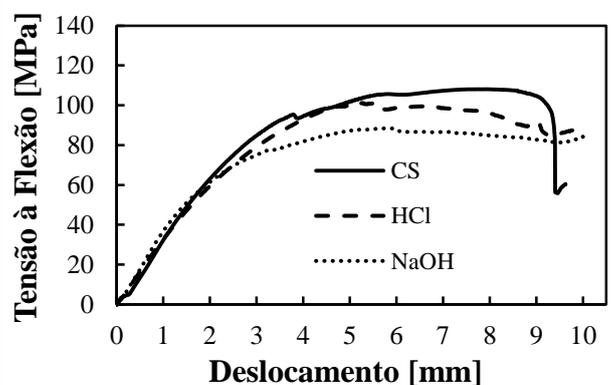


Figura 4.3. 3PB para 30°.

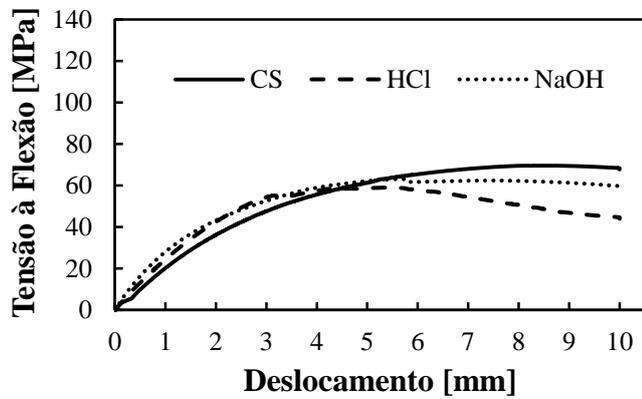


Figura 4.4. 3PB para 45°.

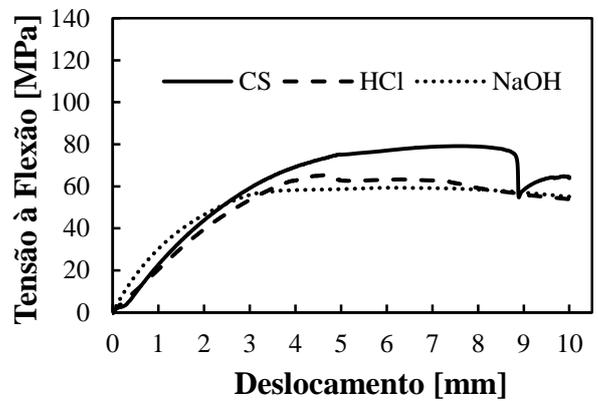


Figura 4.5. 3PB para 60°.

Tabela 4.2. Resultados Tensão Média à Flexão de 3PB.

Orientação	Provet	Tensão Média à Flexão [MPa]	Desvio Padrão [MPa]
0°	CS	123,71	16,76
	HCl	115,22	10,42
	NaOH	99,04	15,28
30°	CS	98,54	5,69
	HCl	98,36	3,85
	NaOH	85,17	6,41
45°	CS	66,58	2,01
	HCl	62,27	4,34
	NaOH	61,47	6,68
60°	CS	74,53	4,46
	HCl	63,07	9,46
	NaOH	58,49	10,80

Explorando os resultados obtidos neste trabalho (Tabela 4.2), pode-se verificar que em todas as orientações as curvas referentes aos provetes de controlo apresentam o mesmo comportamento que as curvas alusivas aos provetes sujeitos à ação de ambientes hostis. Esta constatação está implícita em todos os gráficos apresentados nas Figuras 4.2 a 4.5. Para a orientação de 0° verifica-se um decréscimo de cerca de 7% e 20% dos provetes imersos em HCl e NaOH, respetivamente. Para os provetes com 30° de orientação é observada uma redução de cerca de 13%, dos provetes imersos em NaOH quando comparados com os provetes de controlo, sendo que para esta orientação a influência de HCl não é significativa. Para 45° verifica-se uma diminuição de 6,5% da tensão final para HCl e 7,7% da tensão final para NaOH. Para 60° , a tensão final reduz 15,4% e 21,5% para HCl e NaOH, respetivamente, sempre tendo como referência os provetes de controlo.

Para completar, entende-se que as curvas 0° e 30° e as curvas 45° e 60° são mais comuns entre si. No que toca às curvas de 45° e 60° , estas são muito similares no seu percurso de tensão ao longo do deslocamento tanto na região elástica como na região final da curva, ou seja, são praticamente equivalentes na sua totalidade. O mesmo já não acontece para 0° e 30° . As curvas de 30° expõem uma zona de comportamento elástico entre as curvas 45° e 60° (idênticas) e 0° .

De um ponto de vista geral, existe uma relação de comparação entre as quatro orientações. Pelas percentagens de diminuição da tensão à flexão conclui-se que o ambiente de NaOH é mais hostil que HCl, o que está em concordância com os resultados de [17, 18, 19], e para sustentar esse impacto das soluções, os resultados adquiridos foram relacionados tendencialmente. Partindo da mesma orientação, os dados finais dos ensaios dos provetes de controlo e das soluções estão esquematizados graficamente, Figuras 4.6 a 4.9. A tendência decrescente na tensão à flexão resulta na ordem do tipo de ensaios inseridos no eixo das abcissas onde os ensaios estão pela ordem de abscissa: controlo, HCl e NaOH.

Os gráficos de tendência (Figura 4.6 a 4.9) ajudam a entender que os provetes de NaOH são mais suscetíveis à influência de ambientes hostis. A orientação de 45° apresenta uma monotonia praticamente constante. As restantes orientações apresentam uma notável monotonia decrescente até NaOH. Em todos os casos, NaOH é a solução menos resistente à solitação de 3PB. Esses gráficos estão apresentados com a gama de desvio padrão e estão dispostos horizontalmente para evidenciar e melhorar a comparação da curva e dos

intervalos de resistência. Assim, os gráficos de 0°-30° e 45°-60° estão colocados na horizontal para melhor interpretação.

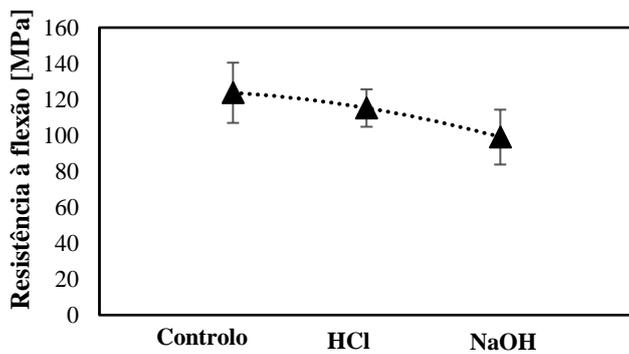


Figura 4.6. Tendência de 3PB para 0°.

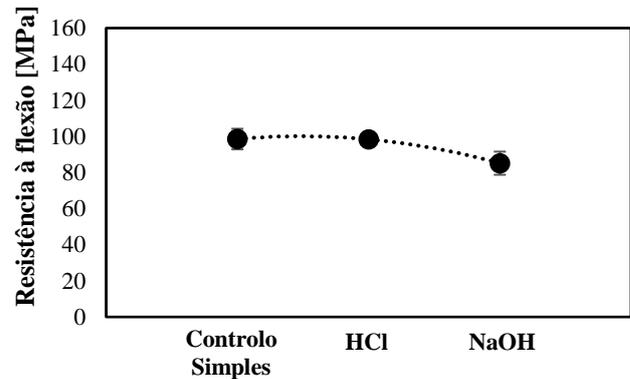


Figura 4.7. Tendência de 3PB para 30°.

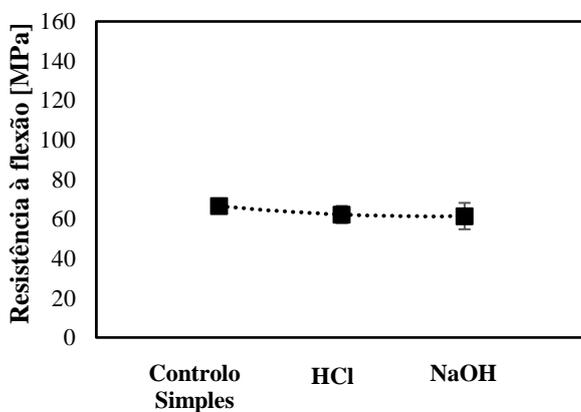


Figura 4.8. Tendência de 3PB para 45°.

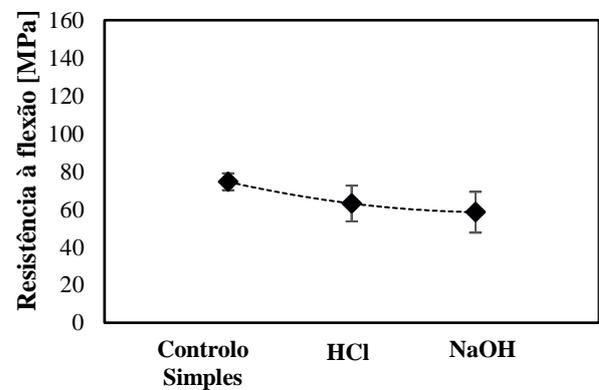


Figura 4.9. Tendência de 3PB para 60°.

Para entender o impacto da imersão intrinsecamente, os provetes após sujeitos a ensaios de 3PB foram analisados ao microscópio ótico. Deste modo, o provete de controlo para 0° (Figura 4.10) apresenta principalmente rotura de fibras. O provete imerso em HCl (Figura 4.11) mostra a mesma situação, rotura de fibras, mas também a rotura de matriz mais acentuada. Já o provete imerso em NaOH (Figura 4.12) possui rotura de fibra e de matriz

mais pronunciadas. Estas situações descritas acontecem na generalidade das restantes orientações.

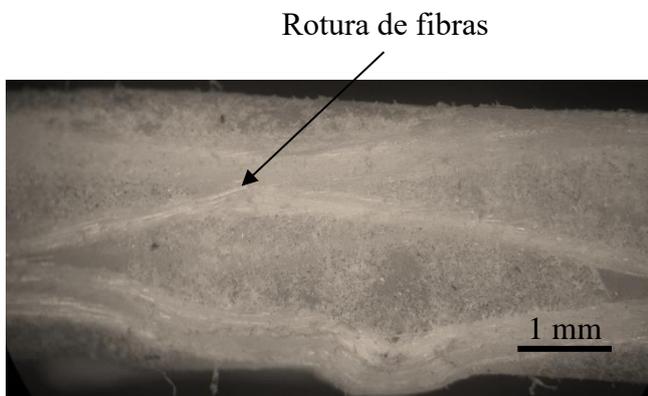


Figura 4.10. 3PB CS_0°.

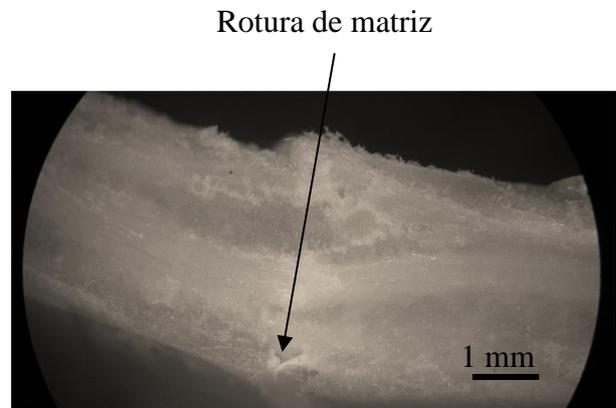


Figura 4.11. 3PB HCl_0°.



Figura 4.12. 3PB de NaOH_0°.

4.3. Relaxação de Tensões (RT)

Após garantida uma tensão mínima, tensão máxima no limite elástico, obtida pelos ensaios de 3PB foram realizados os ensaios de RT. As análises e gráficos característicos dos ensaios RT são representados de maneira diferente comparativamente aos 3PB. Assim, para se analisar este tipo de sollicitação, os resultados estão organizados partindo de gráficos da tensão e do quociente entre a tensão instantânea e a tensão inicial ao longo do tempo.

4.3.1. Ensaios de controlo

Com já é sabido, para cada tipologia de controlo foram realizados três ensaios experimentais. Seguidamente à recolha dos dados referentes a esses três ensaios foi calculada uma média temporal e de tensão. O objetivo de tal propósito surge pela criação de uma curva com menos suscetibilidade a erros. Nessa curva foi admitida uma margem de erro para cooperar com a presença de possíveis erros experimentalmente inevitáveis. Foi definida uma tensão de 30 MPa e esse valor foi decidido tendo em consideração, como anteriormente referido, o valor mínimo observado durante os ensaios de 3PB, nas variadas condições em estudo, 58,5 MPa, e considerando um coeficiente de segurança de aproximadamente 2, de forma a evitar que durante os ensaios de RT se entrasse, nalguma das condições, fora do regime elástico.

Os ensaios de controlo vão ser confrontados com os ensaios dos provetes imersos tal como foi efetuado na investigação dos ensaios de 3PB. Assim, os resultados dos provetes de controlo vão ser examinados primeiro para posteriormente serem confrontados com os resultados dos provetes imersos em soluções.

Realizando este procedimento para cada orientação, obtiveram-se os resultados apresentados nas Figuras 4.13 a 4.16.

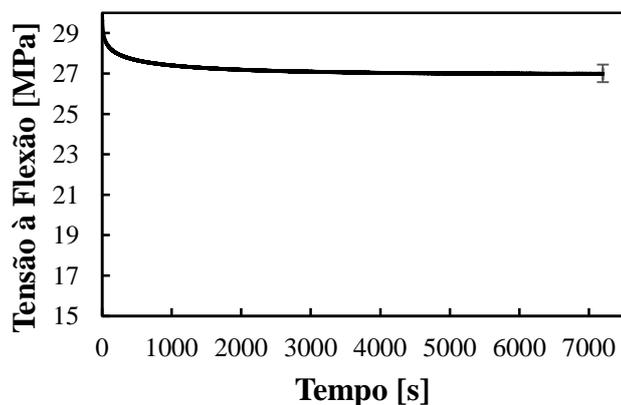


Figura 4.13. RT para CS_0°.

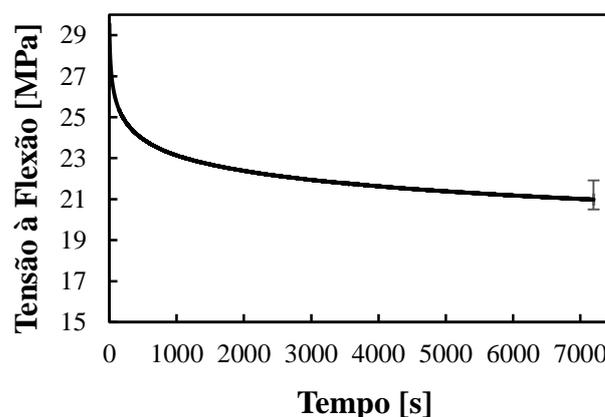


Figura 4.14. RT para CS_30°.

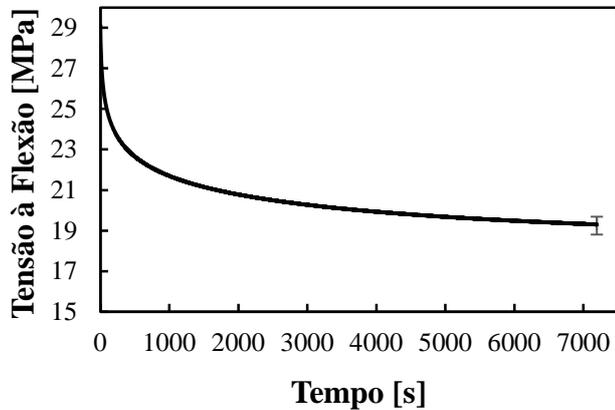


Figura 4.15. RT para CS_45°.

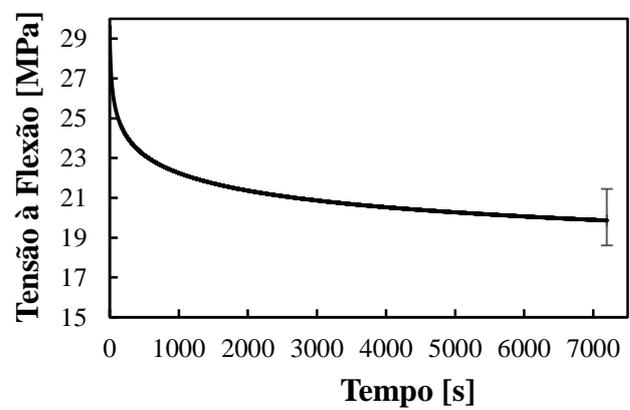


Figura 4.16. RT para CS_60°.

Atentando às Figuras 4.14 a 4.16 pode-se constatar que para a orientação de 0° a curva se mantém praticamente linear, ou seja, não se observou significativo decréscimo no valor da tensão inicial. O grande objetivo deste subcapítulo é demonstrar individualmente cada solicitação de RT e correspondente desvio padrão para dar reforço de erros possíveis. Vão ser também apresentados resultados exteriores de estudos para posterior análise comparativa aos nossos resultados. Da Tabela 4.3 constata-se que para 45° o valor final para a tensão normal é o menor, o que significa um maior valor de RT. O entanto, os valores finais para a tensão normal para 30°, 45° e 60° são muito aproximados.

Tabela 4.3. Erros positivos e negativos.

Orientação	Amostra	Tensão Final [MPa]	Valor de Erro Positivo [MPa]	Valor de Erro Negativo [MPa]
0°	CS	26,98	0,45	0,41
30°	CS	20,98	0,93	0,49
45°	CS	19,30	0,39	0,49
60°	CS	19,86	1,59	1,25

De encontro aos resultados do presente estudo, e segundo a Tabela 4.3, com as margens de erros conclui-se que a orientação de 60° é mais suscetível ao erro e, portanto, tem maior amplitude no seu intervalo. No entanto, a margem de erro está abaixo dos 10%, sendo por isso um valor perfeitamente aceitável.

Fora isso, as curvas 45° e 60° assemelham-se no seu desempenho. Estas curvas apresentam praticamente o mesmo valor de tensão final contribuindo para um gráfico aparentemente idêntico. A curva de 0° assume um caso diferente e com a maior tensão final estando a curva de 30° entre as restantes curvas.

Uma vez que as representações gráficas dos provetes de controlo vão ser investigadas no subcapítulo seguinte, devido ao estudo do efeito da orientação, é mais perspicaz tomar as devidas discussões partindo de um gráfico mais simples e síntese de todos os provetes de controlo. Neste caso, no subcapítulo 4.3.2 dar-se-á mais ênfase à sua comparação.

4.3.2. Efeito da orientação

Os resultados de 3PB ditaram um comportamento independente relativamente a 0° e às duas orientações de 45° e 60° em sintonia. A orientação de 30° assumiu um comportamento entre esses dois casos. Estudando neste subcapítulo outra solicitação, a RT, ver-se-á se os resultados da 3PB vão ao encontro aos resultados da relaxação. Caso os resultados não se apoiem mutuamente estudar-se-á uma conjugação entre os dois para se tentar obter conclusões corretas na globalidade.

Esta análise requer diferenças percentuais onde serão o principal fator de distinção e caracterizará o tipo de orientação definida. É de salientar que as orientações são primeiro analisadas individualmente e, partindo dos seus resultados, vão ser comparados aos resultados das restantes orientações. Isto é, com os resultados individuais tentar-se-á definir um padrão de semelhança entre as diferentes orientações. O padrão de semelhança que se pretende atingir surge na necessidade de assumir curvas com comportamentos idênticos e defini-los com o mesmo desempenho mecânico. Tal como no subcapítulo anterior vão ser apresentados os resultados dos provetes de controlo para perceber as propriedades mecânicas iniciais e, posteriormente, poder avaliá-las nos resultados da Figura 4.17. Estes resultados

têm como eixo das ordenadas o quociente entre a tensão instantânea na execução do procedimento e a tensão nominal pré-definida de 30 MPa.

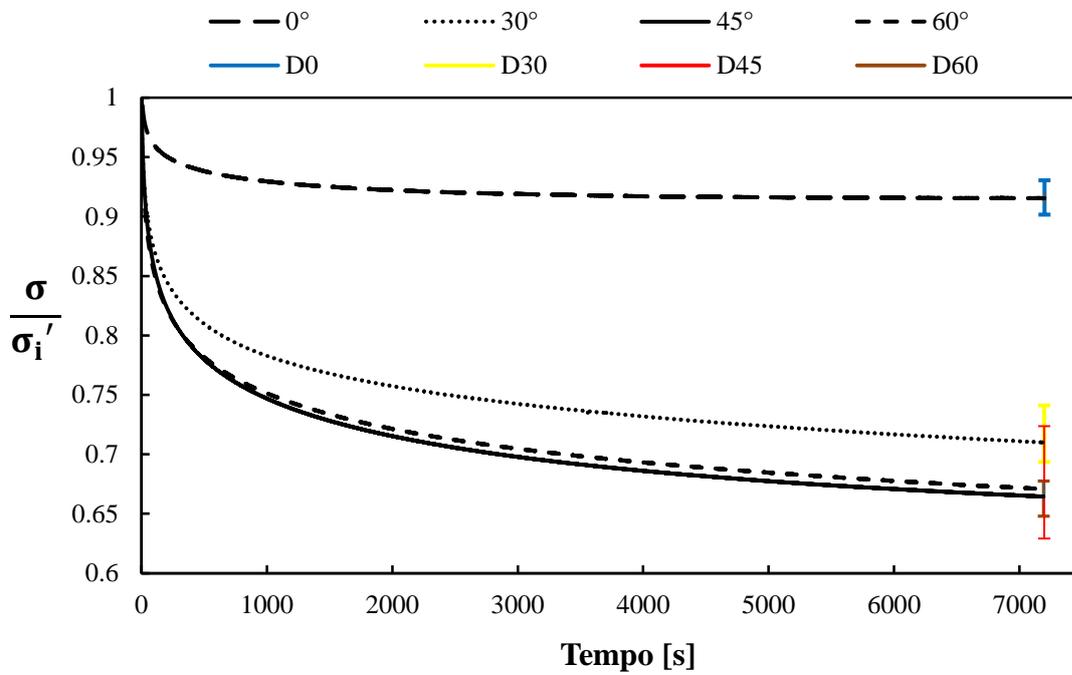


Figura 4.17. CS.

O estudo do efeito da orientação nos ensaios dos provetes de controlo apresenta três tipos de comportamentos. Um comportamento constituído pela curva da orientação de 0° onde descreve um comportamento independente e inequívoco aos restantes. E um outro conjunto com as curvas das restantes orientações, 45° e 60°, em que as curvas descrevem um comportamento semelhante de RT. A orientação de 30° apresenta um comportamento entre os dois comportamentos falados anteriormente.

O relaxamento que a tensão descreveu atingiu uma tensão final que é o motivo pelo valor das percentagens de relaxação da tensão. O valor da tensão final permite caracterizar a solicitação (Tabela 4.5).

Tabela 4.4. Percentagens de RT.

Orientação	Provete	Tensão Final [MPa]	Relaxação de tensão [MPa]	Desvio Padrão [MPa]
0°	CS	26,98	3,02	+0,015 -0,013
30°	CS	20,98	9,02	+0,031 -0,016
45°	CS	19,30	10,70	+0,013 -0,016
60°	CS	19,86	10,14	+0,053 -0,041

No estudo de Reis *et al.* [19] observou-se que a resistência à tração dependia significativamente da orientação da fibra e, independentemente da solução, o tempo de exposição e temperatura foram determinantes para o impacto da resistência à tração.

Em estudos de análise de fadiga e dano em compósito de polipropileno reforçado com fibra de vidro concluem que a resistência à fadiga de laminados de apenas 0° (fibras na orientação de 0°) é superior 1,5-1,8 vezes a laminados de +45°/0°/-45° e +30°/-30°/0° [23, 24]. Em compósitos laminados demonstram que menores ângulos entre a fibra e a direção do comprimento da amostra, independentemente do compósito, tem uma alta energia de fratura à flexão, tal como de resistência [25, 26].

Pela Tabela 4.5, os dois conjuntos de curvas possuem diferentes comportamentos e, conseqüentemente, apresentam tensões finais distintas. O primeiro conjunto, curva da orientação 0°, possui uma tensão final de aproximadamente 27 MPa contribuindo para uma relaxação de tensões de 10,05%, ou seja, realça-se diminuição da tensão em aproximadamente 3 MPa.

O segundo conjunto é expresso por uma tensão final que ronda os 19-20 MPa. Para as duas orientações que constituem este conjunto, o relaxamento da tensão assenta num intervalo de 33-35%. Em virtude destes resultados considera-se dois tipos de resposta a uma solicitação deste tipo. E por último, a orientação de 30° é definida pela tensão final de 21 MPa com uma relaxação de tensão de 30%.

A resposta mais eficaz de relaxação de tensões é verificada para 0° e a resposta menos eficaz para 45° e 60° caracterizada uma queda observável da tensão. Com base nos resultados

pode-se notar que a orientação mais resistente à solicitação é a 0° uma vez que a tensão apenas relaxa dos 30 para os 27 MPa, ou seja, a solicitação tem um pequeno impacto mecânico. No mesmo efeito, as orientações 45° e 60° possuem a menor resistência à relaxação, logo são as orientações mais fracas e com maior impacto a este tipo de solicitação.

De encontro aos resultados tanto da 3PB como da RT repara-se que os resultados se apoiam mutuamente, isto é, os resultados são concordantes.

4.3.3. Efeito da Solução

Depois do estudo do efeito da orientação dos provetes de controlo está-se em condições suficientes para estudar o efeito da solução nas respetivas orientações. Com efeito, a análise do impacto da solução nos provetes surgirá segundo a relação do quociente da tensão instantânea e tensão inicial com o tempo de solicitação.

Como referido anteriormente, Feng *et al.* [16] estudaram os efeitos de ambientes corrosivos nas propriedades das placas pultrudadas de GFRP em solução alcalina (NaOH), salina (NaCl) e ácida (H₂SO₄) com diferentes concentrações a 60 e 90°C. Verificaram que os provetes tiveram um aumento de massa devido à penetração da solução no compósito, onde sua massa aumentou entre 0-2% até 30 dias de imersão para todas as soluções. É, portanto, visível a importância do estudo de condições no impacto material onde soluções ácida e básica à mesma temperatura, mas com concentrações diferentes podem ter impactos semelhantes (Tabela 4.4).

Tabela 4.5. Resultados de Feng *et al.* [16].

Condições	Resistência à flexão (decrécimo)
Solução: H ₂ SO ₄ Concentração: 30% Temperatura: 60°C	≈ 32%
Solução: NaOH Concentração: 10% Temperatura: 60°C	≈ 30%

Por outro lado, Amaro *et al.* [18] que estudaram o efeito de NaOH e HCl em compósitos de matriz epóxida reforçada com fibra de vidro e constataram a absorção das soluções pelos provetes. Obtiveram um aumento de massa de 4,7% e de 17% para HCl e NaOH, respectivamente, após 36 dias de imersão, tendo concluído que essa absorção leva à expansão da matriz. A resistência à flexão diminuiu cerca de 5,8%, 11,1% e 22% para 12, 24 e 36 dias de exposição em NaOH, respectivamente. Uma tendência similar é avaliada para o módulo de flexão. Para solução de HCl, a resistência diminuiu, respectivamente, para o mesmo tempo de exposição, cerca de 2,9; 9,0 e 16,2%, o que vem de encontro aos resultados deste estudo.

Outros estudos executados por Reis *et al.* [19] suportam o efeito de condições extremas na resistência ao impacto de compósitos GFRP e defendem que os laminados imersos em HCl diminuiram a resistência ao impacto comparativamente aos provetes de controlo, cerca de 1,4; 4,5 e 7,2% depois de 15, 30 e 60 dias de exposição, respectivamente. Para as mesmas condições, a resistência ao impacto diminuiu cerca de 4,8; 16,1 e 28,6% em NaOH.

Já Bazli *et al.* [27] avaliaram o efeito de ambientes agressivos de água salgada e temperatura de 20°C, 40°C e 60°C nas propriedades mecânicas em perfis pultrudados de GFRP. A sua imersão a 60°C causa um aumento de 0,4% de massa após 145 dias de imersão.

Nos artigos atrás referenciados obtiveram diferentes relações de massa, uma vez que trabalharam com diferentes materiais e ambientes. Genericamente todos eles defendem o aumento da massa em todas os provetes independentemente das soluções, o que não vai de encontro aos resultados obtidos na Tabela 4.1. Os resultados demonstram um aumento da massa nos provetes inseridos em NaOH e uma diminuição de massa em HCl. Apesar das percentagens de aumento e queda serem muito aproximadas, as percentagens de diminuição da massa são ligeiramente superiores.

Os resultados que refletem o efeito da solução na RT estão apresentados nas Figuras 4.18 a 4.21 e Tabela 4.6.

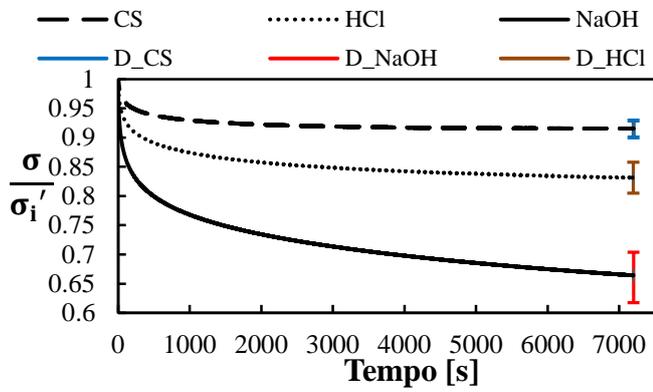


Figura 4.18. Efeito da solução para 0°.

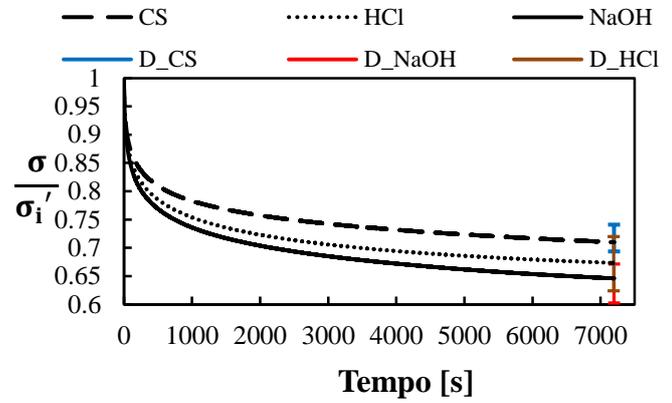


Figura 4.19. Efeito da solução para 30°.

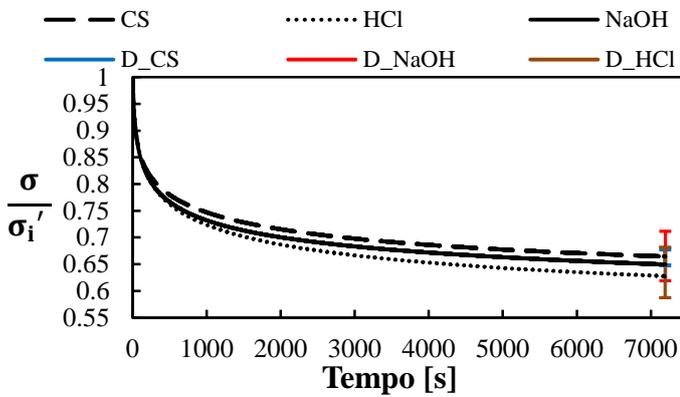


Figura 4.20. Efeito da solução para 45°.

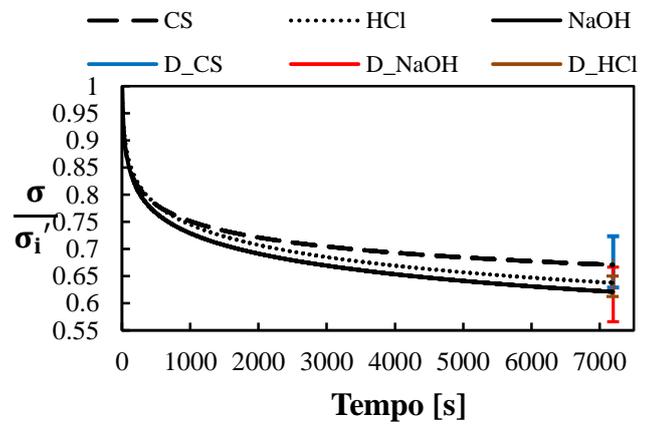


Figura 4.21. Efeito da solução para 60°.

Tabela 4.6. Relaxação de tensões.

Orientação	Provete	Tensão Final [MPa]	Relaxação de Tensão [MPa]	Desvio Padrão [MPa]
0°	CS	26,98	3,02	+0,013 -0,015
	HCl	24,61	5,39	+0,026 -0,026
	NaOH	19,87	10,13	+0,039 -0,046
30°	CS	20,98	9,02	+0,031 -0,016
	HCl	19,76	10,24	+0,046 -0,049
	NaOH	18,92	11,08	+0,025 -0,043
45°	CS	19,30	10,70	+0,013 -0,016
	HCl	17,92	12,08	+0,053 -0,040
	NaOH	19,20	10,80	+0,061 -0,030
60°	CS	19,86	10,14	+0,052 -0,041
	HCl	18,34	11,66	+0,012 -0,024
	NaOH	17,58	12,42	+0,045 -0,054

Os provetes de controlo, imersos em HCl e em NaOH demonstram percentagens de relaxação de tensão de modo crescente. Os provetes em ambiente alcalino sofreram maior impacto e, portanto, a solução alcalina foi mais agressiva em todas as situações, exceto para 45°.

Analisando-se a Tabela 4.6, pode-se verificar que:

1) inicialmente, observa-se que foram atingidas elevadas percentagens de relaxação de tensões aquando comparadas com as percentagens que resumem os artigos estudados na revisão bibliográfica;

2) a solução de NaOH tem maior impacto nas propriedades mecânicas que a solução de HCl, o mesmo verificado por Amaro *et al.* [18] e Reis *et al.* [19];

3) para 0° têm-se os menores relaxamentos da tensão, motivo esse justificado pelas tensões finais alcançadas;

4) relaxação de tensão de valor de 3,02; 5,39 e 10,13 MPa nos provetes de 0° para controlo, HCl e NaOH, respetivamente;

5) na generalidade das orientações e para duas soluções, os provetes de 0° apresentam menores relaxações de tensão;

6) para 30° as tensões finais dos provetes imersos e não imersos são próximas, o que conduz a relaxações de tensões também aproximadas;

7) relaxação de tensões de 9,02; 10,24 e 11,08 MPa nos provetes de 30° para controlo, HCl e NaOH, respetivamente;

8) também para 45° as tensões finais são próximas resultando em relaxações de tensões no mesmo caso;

9) relaxação de tensões de 10,70; 12,08 e 10,80 MPa nos provetes de 45° para controlo e HCl, respetivamente;

10) em comum com 30° e 45°, os resultados de 60° para tensões finais e as relaxações de tensões são muito próximas.

11) relaxação de tensões de 10,14; 11,66 e 12,42 MPa nos provetes de 60° para controlo, HCl e NaOH, respetivamente;

12) revendo caso a caso nota-se que há uma maior semelhança dos resultados de 45° com os de 60°;

13) os resultados de 30° não apresentam uma semelhança tão evidente como no anterior, mas encontram-se em entre os resultados de 0° e os de 45°-60° apesar de ligeiras discrepâncias.

De acordo com as tendências apresentadas nas Figuras 4.22 e 4.23 observa-se uma disposição crescente que classifica a RT. Nas tendências dos ensaios de 3PB a resistência diminuía e, portanto, para esses resultados não refutarem possíveis tendências na RT, estes teriam que descrever uma tendência crescente. A relaxação da tensão possui tendência crescente porque tem um efeito contrário ao da resistência, ou seja, há uma maior facilidade em relaxar a tensão. Quer isto dizer que os provetes que nos ensaios de 3PB eram os pontos com maior resistência, serão os pontos com menor relaxação da tensão. Este raciocínio acompanha os pontos da tendência e assume as mesmas possíveis conclusões que a flexão. As orientações 30°, 45° e 60° (não tendo em conta NaOH para 45° pelo salto da Figura 4.22) possuem relaxações semelhantes. Ainda assim, comparando as três orientações, a de 30° possui menor relaxamento estando uma tendência entre 0° e 60°. A orientação 0° é a orientação que melhor resiste à relaxação, ou seja, a mais resistente não refutando os resultados de 3PB.

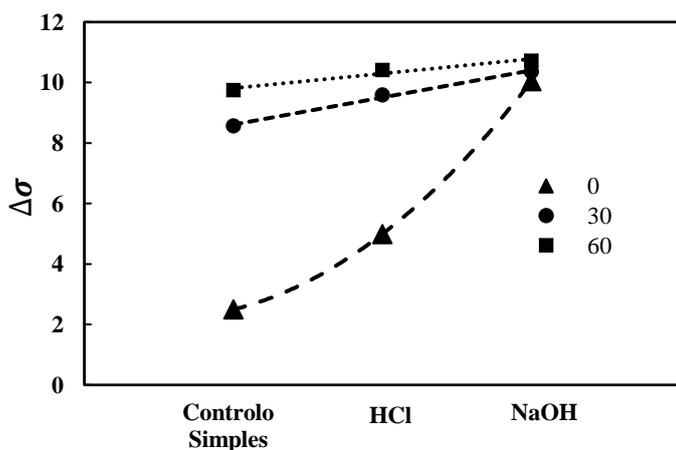


Figura 4.22. Tendência para RT_0°/30°/60°.

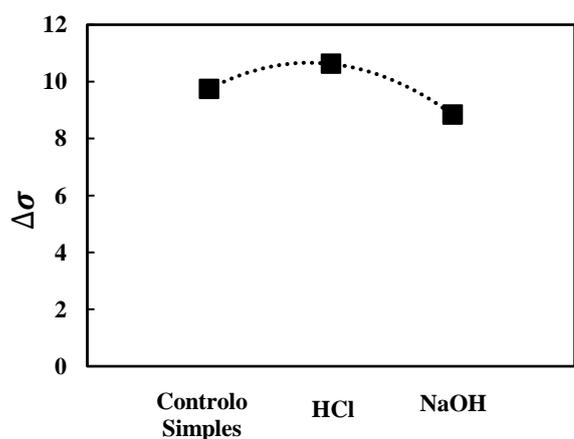


Figura 4.23. Tendência para RT_45°.

Os provetes de RT também foram analisados microscopicamente onde é possível verificar que todos apresentam ruturas de fibras (Figuras 4.24 a 4.27). Os provetes de 0° e 45° possuem visivelmente uma estrutura mais homogênea comparativamente às restantes. As orientações de 30° e 60° são distinguidas pela concentração de aglomerados. Estes resultados estão em conformidade com as percentagens de RT (Tabela 4.6) obtidas, onde são maiores para as orientações de 30° e 60°.

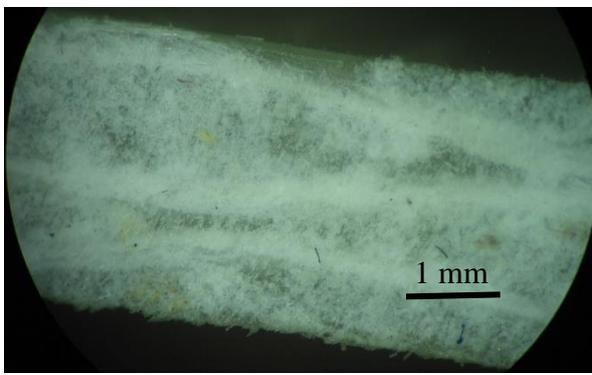


Figura 4.24. RT para NaOH_0°.

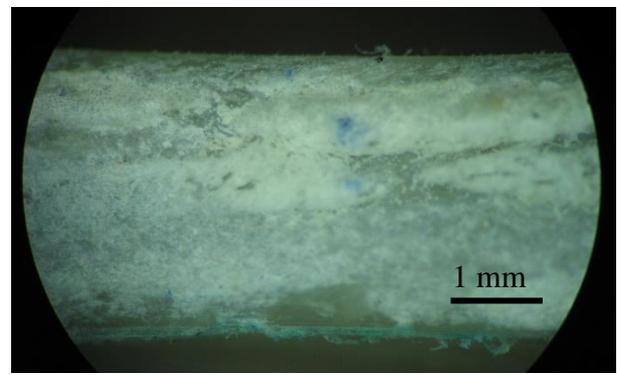


Figura 4.25. RT NaOH_30°.

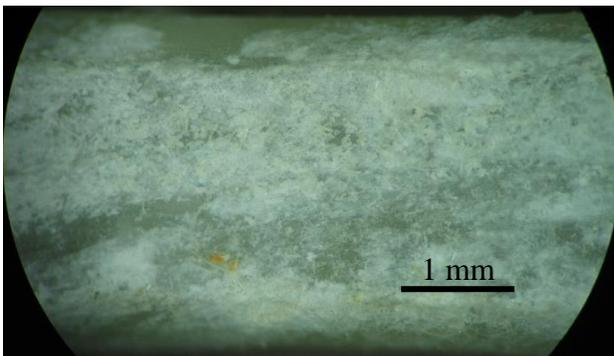


Figura 4.26. RT NaOH_45°.

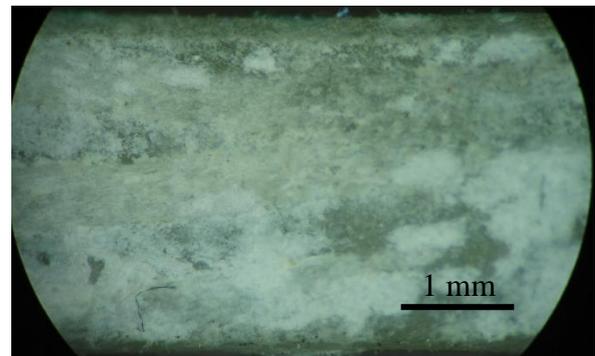


Figura 4.27. RT NaOH_60°.

4.3.4. Modelo KWW

O Modelo de *Kohlrausch-Williams-Watts* (KWW) é um método de ajuste para relaxação de tensões em materiais viscoelásticos. Este método tem uma precisão muito alta e resolve equações lineares de uma análise de elementos finitos complexos. Uma das qualidades deste método assenta em poder se ajustar à curva experimental da função KWW e também aos dados experimentais diretamente.

Os dados experimentais utilizados para a execução deste modelo foram os tempos e tensões médias da relaxação de tensões de todos os provetes de controlo e imersos em solução. A primeira fase da elaboração do método consistiu em obter a relação linear [28] na representação gráfica $f[\ln\left(\ln\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)\right); \ln(t)]$ e tirando deste modo os parâmetros β e τ .

A segunda fase passou pela construção gráfica da tensão média experimental e da tensão calculada do modelo em função do tempo. Com isto, os dados experimentais são relacionados com uma curva teórica fundamentada pelo Modelo KWW nas seguintes Figuras 4.28 a 4.39 e Tabelas 4.7 a 4.10.

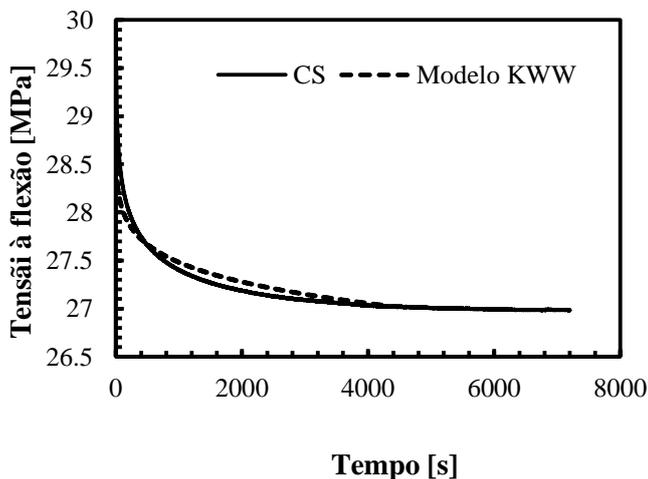


Figura 4.28. Modelo KWW para CS₀°.

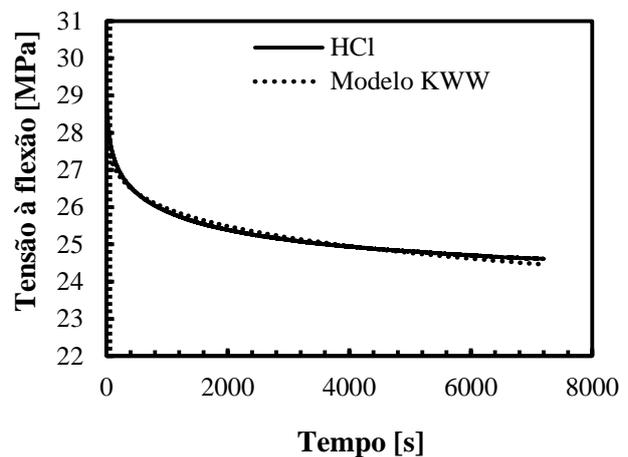


Figura 4.29. Modelo KWW para HCl₀°.

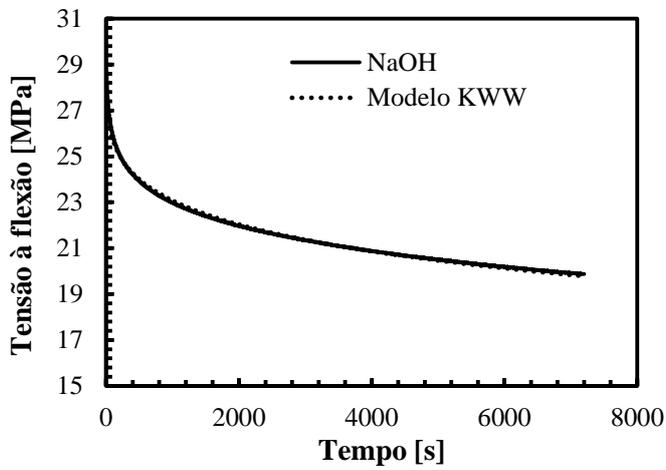


Figura 4.30. Modelo KWW para NaOH_0°.

Tabela 4.7. Modelo KWW para 0°.

Solução	β	τ
CS	0,145069	89902803491
HCl	0,189331	45224997,62
NaOH	0,235479	305645,7005

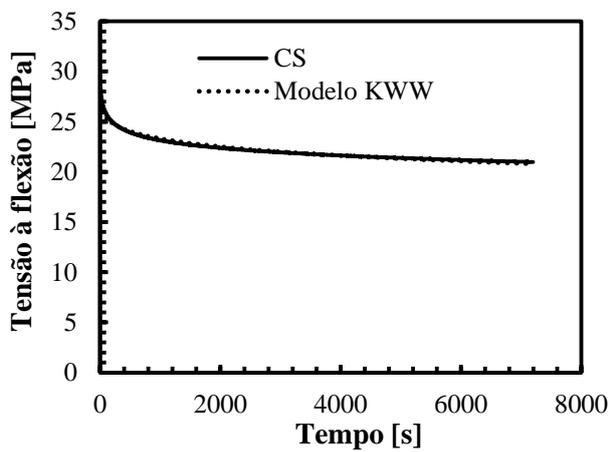


Figura 4.31. Modelo KWW para CS_30°.

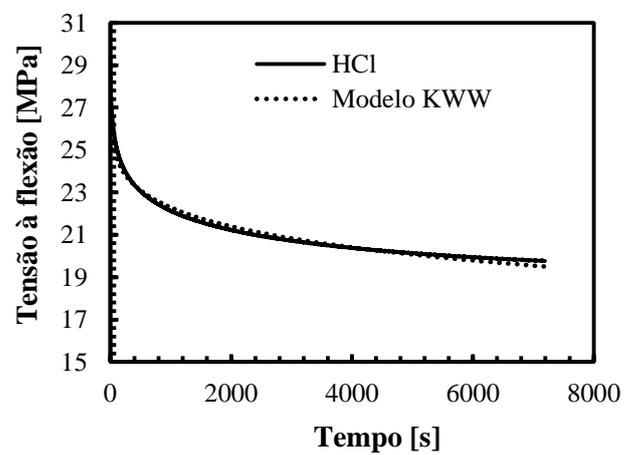


Figura 4.32. Modelo KWW para HCl_30°.

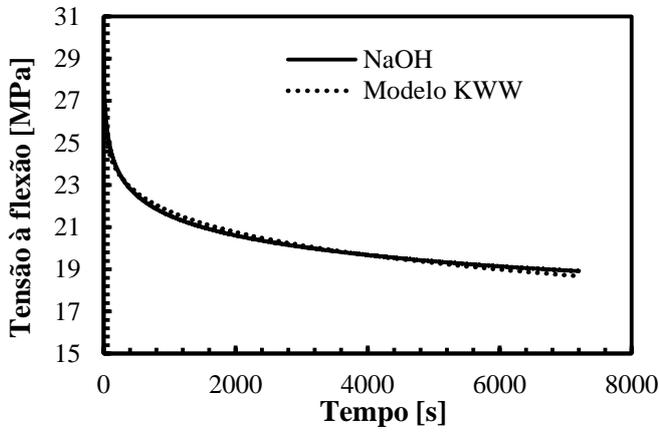


Figura 4.33. Modelo KWW para NaOH_30°.

Tabela 4.8. Modelo KWW para 30°.

Solução	β	τ
CS	0,198619	1399618,462
HCl	0,200117	629702,6755
NaOH	0,209495	327429,8931

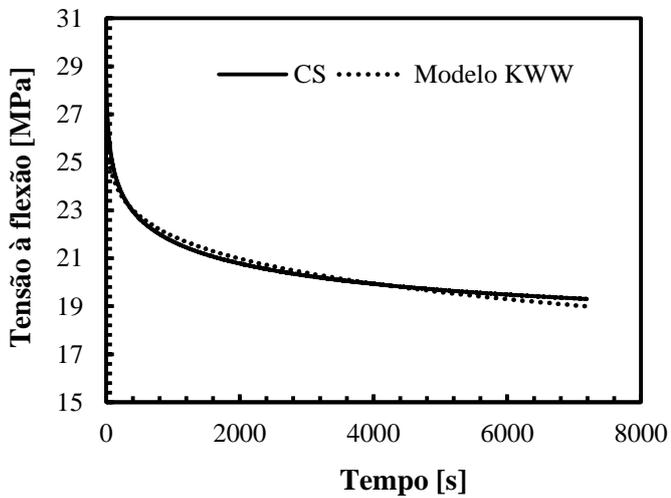


Figura 4.34. Modelo KWW para CS_45°.

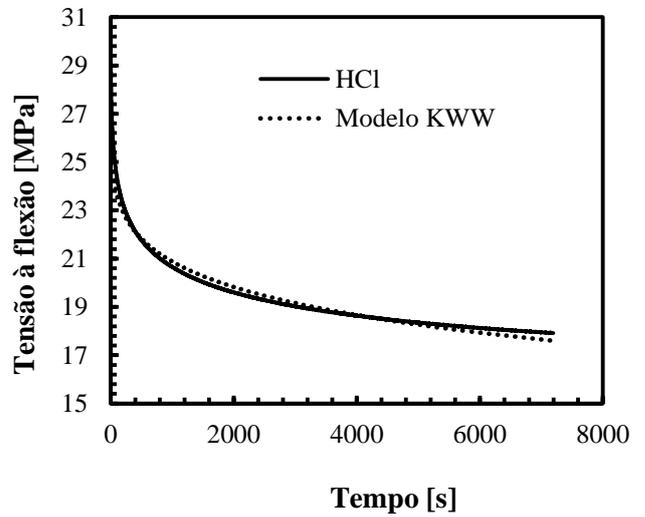


Figura 4.35. Modelo KWW para HCl_45°.

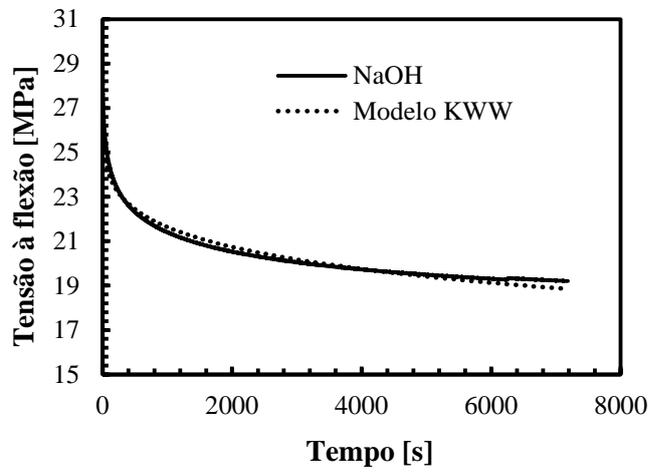


Figura 4.36. Modelo KWW para NaOH_45°.

Tabela 4.9. Modelo KWW para 45°.

Solução	β	τ
CS	0,208375	438078,714
HCl	0,22079	193189,5024
NaOH	0,205856	523093,1228

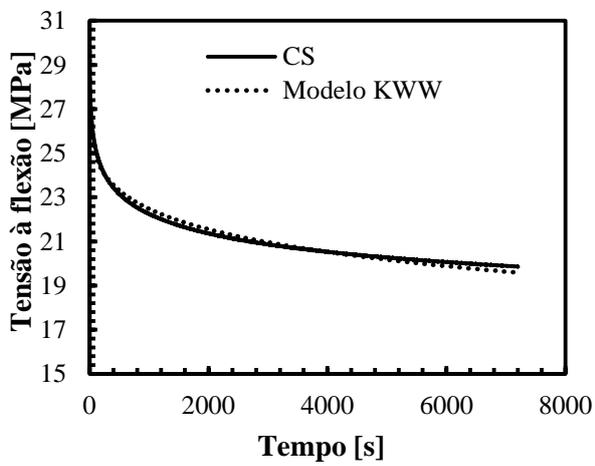


Figura 4.37. Modelo KWW para CS_60°.

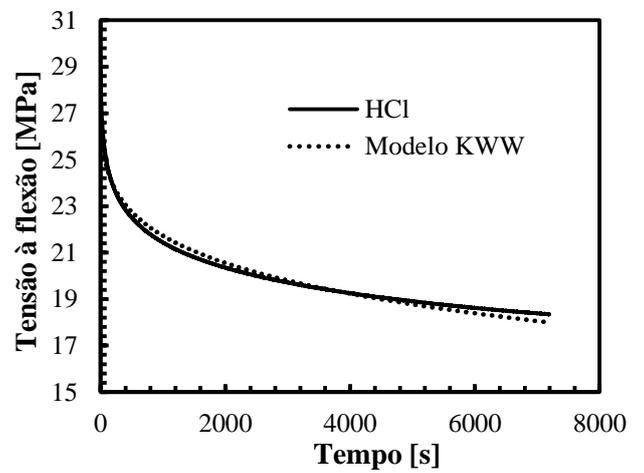


Figura 4.38. Modelo KWW para HCl_60°.

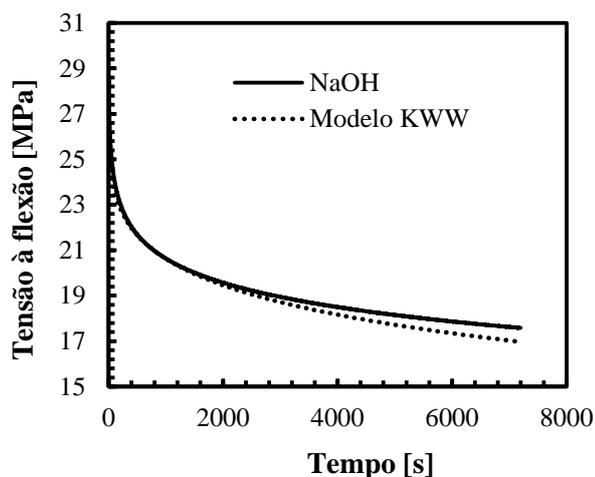


Figura 4.39. Modelo KWW para NaOH_60°.

Tabela 4.10. Modelo KWW para 60°.

Solução	β	τ
CS	0,204829	537559,857
HCl	0,259988	132461,6351
NaOH	0,243664	112585,5186

A terceira e última fase consistiu no estudo da orientação no tipo de exposição submetido de maneira a obter alguma relação nos seus desempenhos gráficos. Como se pode verificar nas Figuras 4.40 a 4.42, os parâmetros relacionam-se com o tipo de exposição em funções polinomiais. Estas referidas figuras permitem analisar as gamas de orientação]0°,30°[,]30°,45°[e]45°,60°[para as tipologias de controlo, HCl e NaOH que não foram alvo no nosso estudo. Ou seja, como apenas foram estudadas as orientações 0°, 30°, 45° e 60°, estes gráficos permitem obter os parâmetros β e τ nos intervalos falados com a substituição de valores nas equações obtidas pelo ajuste de linhas de tendência.

Nas Figuras 4.40 e 4.41, para CS e HCl, β possui valores próximos na mesma gama de orientações, logo existe uma relação de semelhança entre os valores β . Os valores de β decrescem da orientação 0° até 30°, onde existem valores praticamente constantes de 30° até 60° (o que não se verifica para NaOH).

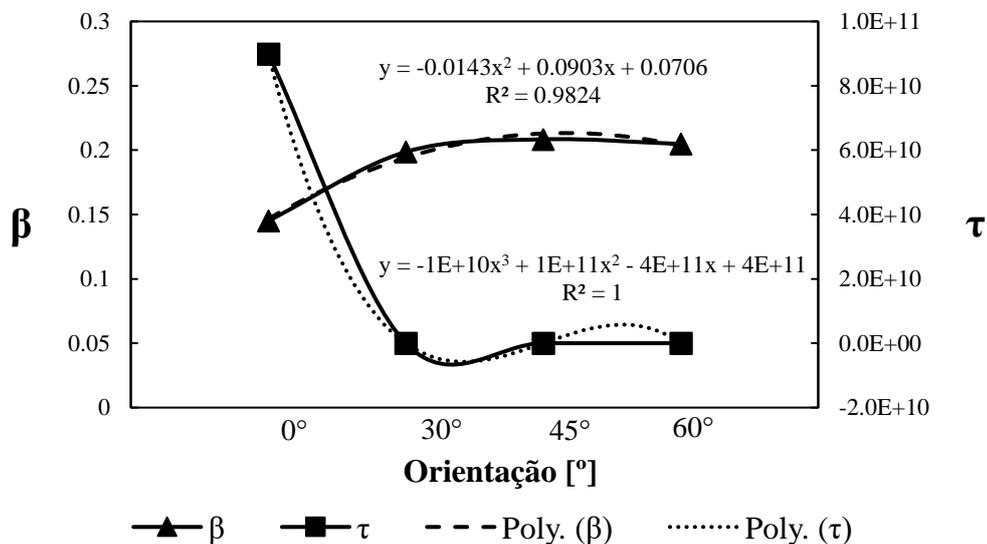


Figura 4.40. Relação Polinomial para CS.

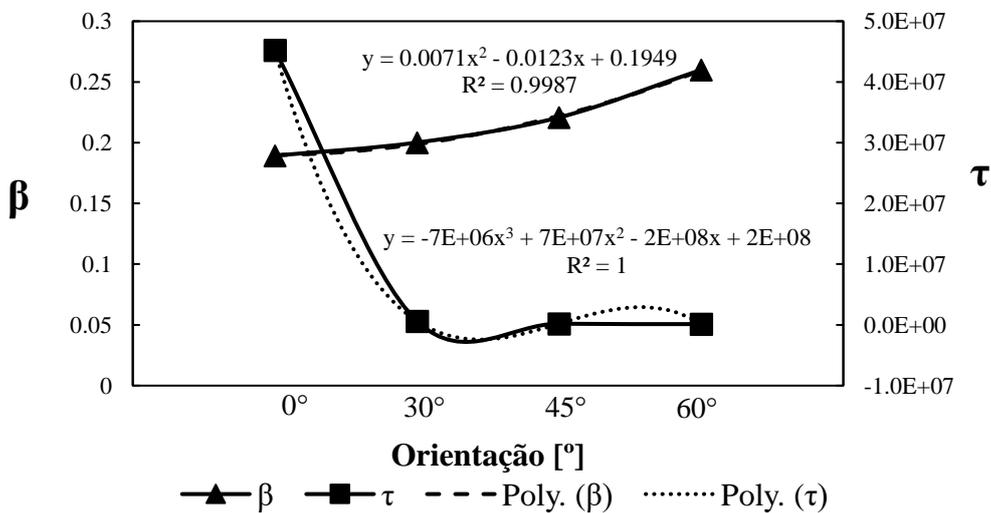


Figura 4.41. Relação Polinomial para HCl.

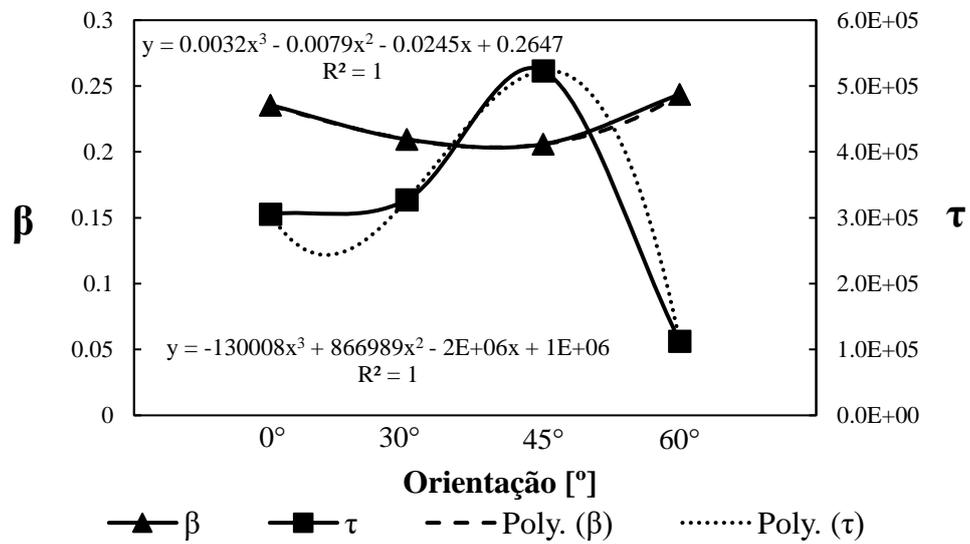


Figura 4.42. Relação Polinomial para NaOH.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões desta dissertação e apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros que possam aprofundar e dar continuidade ao estudo do tema.

5.1. Conclusões

Através desta dissertação de carácter experimental conclui-se que:

1) Massa

- Na solução de NaOH e de HCl observa-se um aumento e uma queda de massa de aproximadamente 3-4%, respetivamente.

2) 3PB

- A orientação de 0° tem um comportamento tipicamente frágil do seu domínio elástico e, em contrapartida, as restantes orientações possuem um comportamento tipicamente dúctil;
- as orientações de 30° e 60° são caracterizadas pela rotura dos provetes de controlo no final;
- a nível de tensão média à flexão, os provetes de controlo possuem maiores tensões que os provetes imersos em HCl e maiores ainda que os provetes imersos em NaOH, demonstrados pelas representações de tendências;
- a nível de tensão média à flexão, a orientação de 0° é superior às de 30°, 45° e 60°, por ordem de grandeza, respetivamente.

3) RT

- A orientação de 0° é a orientação mais resistente à RT e a orientação de 45° a menos resistente. As diferenças percentuais de RT entre orientações são elevadas, sendo a orientação de 0° menos suscetível à RT com menos 20%, 25,61% e 23,74% que as respectivas orientações 30°, 60° e 45°, respectivamente;
- a orientação de 0° apresenta um efeito menos pronunciado em função da solução. As orientações de 45° e 60° são as mais afetadas pela solução com maiores valores de RT, sendo estes muito próximos. A orientação de 30°, tal como no efeito da orientação, tem um efeito da solução superior à orientação de 0°, mas inferior às orientações de 45° e 60°;
- a solução de NaOH têm maior impacto nas propriedades mecânicas que a solução de HCl, demonstrado pelas representações de tendências. Independentemente da orientação, a RT é muito semelhante para a solução de NaOH.
- Com o bom ajuste experimental com as previsões do modelo conclui-se que os pressupostos subjacentes do modelo analítico e do procedimento experimental estão em consonância.

5.2. Sugestões

Após a realização desta dissertação, surgem alguns aspetos que merecem especial abordagem para trabalhos futuros:

- Uso de ambientes hostis diferentes como, por exemplo, H₂SO₄ ou NaCl;
- Utilização de ambientes hostis com concentrações de solução diferentes de 20%, por exemplo, 10% e 30%;
- Considerar o efeito de uma temperatura superior à utilizada nesta dissertação, ou seja, superior à temperatura ambiente nos ambientes hostis;
- Aumentar a exposição dos provetes aos ambientes hostis (60 e 90 dias) e prolongar o tempo de relaxação de tensões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A.M. Pereira “Materiais de Construção I”; ESTT.
http://www.estt.ipt.pt/download/disciplina/2932__Compositos_MC1.pdf
- [2] A. Silva “Materiais II”; IST.
https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779571592480/Compositos_0.pdf
- [3] “Materiais Compósitos”; IST, Materials Today, November 2014
<http://disciplinas.ist.utl.pt/qgeral/mecanica/MatComp.pdf>
- [4] E. Farto “Estudo da degradação de materiais compósitos sujeitos a descargas elétricas”;
UC - Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, 2014
- [5] J. F. M. Gomes da Silva “Pré-impregnados de matriz termoplástica: fabrico e transformação por compressão a quente e enrolamento filamental”; FEUP
<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/11738/2/Texto%20integral.pdf>
- [6] J. Correia “Utilização de perfis pultrudidos de fibra de vidro (GFRP) na construção”;
FEUP
https://sigarra.up.pt/feup/pt/conteudos_service.conteudos_cont?pct_id=30541&pv_cod=Za aaw0Txa
- [7] M. Kawai M, Y. Masuko Y, T. Kazama “Stress relaxation behavior of angle-ply CFRP laminate at elevated temperature” Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series A, 50: 2294-2303.
- [8] T. Tang., S. D. Felicelli “Computational evaluation of effective stress relaxation behavior of polymer composites” International Journal of Engineering Science 90 (2015) 76–85.
- [9] N. Obaid, M. T. Kortschot, M. Sain “Predicting the stress relaxation behavior of glass-fiber reinforced polypropylene composites” Composites Science and Technology 161 (2018) 85–91.
- [10] N. Obaid, M. T. Kortschot, M. Sain “Understanding the Stress Relaxation Behavior of Polymers Reinforced with Short Elastic Fibers” Materials (2017), vol. 10, no. 5, pp. 1-15.

- [11] S. W. Zufall, R. P. Kusy “Stress relaxation and recovery behaviour of composite orthodontic archwires in bending” *European Journal of Orthodontics* (2000), vol. 22, no. 1, pp. 1-12.
- [12] M. Banna, J. Shirokoff, J. Molgaard “Effects of two aqueous acidic solutions on polyester and bisphenol A epoxy vinyl ester resins” *Materials Science and Engineering A* 528 (2011) 2137–2142
- [13] D.C. Blackley, N.T. Pike “Viscoelastic properties of fiber-filled elastomers. 3. Properties of elastomer matrices”. *Kautsch. Gummi, Kunstst.* 1978, 31, 16–25.
- [14] S.S. Bhagawan, D.K. Tripathy “Stress relaxation in short jute fiber-reinforced nitrile rubber composites”. *J. Appl. Polym. Sci.* 1987, 33, 1623–1639.
- [15] P. Flink, B. Stenberg “An indirect method which ranks the adhesion in natural rubber filled with different types of cellulose fibres by plots of $E(t)/E(t=0)$ versus $\log t$ ”. *Br. Polym. J.* 1990, 22, 193–199.
- [16] P. Feng, J. Wang, Y. Wang, D. Loughery, D. Niu “Effects of corrosive environments on properties of pultruded GFRP plates” *Composites: Part B* 67 (2014) 427–433.
- [17] M. Stamenovic, S. Putic, M. Rakin, B. Medjo, D. Cikara “Effect of alkaline and acidic solutions on the tensile properties of glass–polyester pipes” *Materials and Design* 32 (2011) 2456–2461.
- [18] A.M. Amaro, P.N.B. Reis, M.A. Neto, C. Louro “Effects of alkaline and acid solutions on glass/epoxy composites” *Polymer Degradation and Stability* 98 (2013) 853-862.
- [19] P.N.B. Reis, M.A. Neto, A.M. Amaro “Effect of the extreme conditions on the tensile impact strength of GFRP Composites” *Composite Structures* 188 (2018) 48–54.
- [20] M.K. Mahmoud, S. Tantawi “Effect of strong acids on mechanical properties of glass/polyester GRP pipe at normal and high temperatures” *Polym-Plast Technol* 2003;42(4):677–88.
- [21] A. Hammami, N. Al-Ghuilani ” Durability and environmental degradation of glass-vinylester composites” *Polym Compos* 2004;25(6):609–16.
- [22] J. Wang, H. GangaRao, R. Liang e W. Liu “Durability and prediction models of fiber-reinforced polymer composites under various environmental conditions” a critical review. *J. Reinf. Plast.Compos.* 2016, 35: 179-21.

- [23] J.A.M. Ferreira, J.D.M. Costa, P.N.B. Reis, M.O.W. Richardson, “Analysis of fatigue and damage in glass-fibre-reinforced polypropylene composite materials” *Composites Science and Technology* 59 (1999) 1461-1467.
- [24] J.A.M. Ferreira, J.D.M. Costa, P.N.B. Reis, “Static and fatigue behaviour of glass-fibre-reinforced polypropylene composites” *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 31 (1999) 67-74.
- [25] Y. Tomita, M. Tempaku “Effect of Fiber Strength on Tensile Fracture of Unidirectional Long Carbon Fiber-Reinforced Epoxy Matrix Composites” *Mater. Charact.*, vol. 38, no. 2, pp. 91-96, 199.
- [26] Y. Tomita, T. Tamaki, K. Morioka “Effect of Fiber Strength on Notch Bending Fracture of Unidirectional Long Carbon Fiber-Reinforced Epoxy Composites” *Materials Characterization* (1998), vol. 41, no. 4, pp. 123-135.
- [27] M. Bazli, H. Ashrafi, A. V. Oskouei, “Effect of harsh environments on mechanical properties of GFRP pultruded profiles” *Composites Part B: Engineering* (2016), vol. 99, pp. 2013-2015.
- [28] M. Razavi-Nouri “Creep and Stress Relaxation Behavior of Polypropylene, Metallocene-Prepared Polyethylene and their Blends” *Iranian Journal of Chemical Engineering* Vol. 9, No. 1 (Winter), 2012, IChE.