

**Durabilidade de compósitos de polímero reforçado com
fibras de vidro produzidos por infusão a vácuo para
aplicações estruturais em engenharia civil**

Beatriz Maria Martins Antunes Tavares da Silva

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientadores:

Professor Doutor João Pedro Ramôa Ribeiro Correia

Doutor Mário Alexandre de Jesus Garrido

Júri

Presidente: Professor Doutor José Alexandre De Brito Aleixo Bogas

Orientador: Professor Doutor João Pedro Ramôa Ribeiro Correia

Vogal: Doutora Susana Bravo Cordeiro Baptista Cabral da Fonseca

Novembro de 2022

(página intencionalmente deixada em branco)

Esta dissertação foi realizada no âmbito do projeto *Durable-FRP – Towards Durability Design of FRP Composites for Civil Engineering Structures*, PTDC/ECI-EGC/4609/2020, financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, por fundos nacionais através do Programa Operacional Regional de Lisboa (PORLisboa) e co-financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do COMPETE – Programa Operacional Fatores de Competitividade (POFC).



FCT Fundação
para a Ciência
e a Tecnologia

Lisb@20²⁰
Programa Operacional
Regional de Lisboa
2014/2020

**COMPETE
2020**
PROGRAMA OPERACIONAL COMPETITIVIDADE E INTERNACIONALIZAÇÃO



UNIÃO EUROPEIA
Fundo Europeu de
Desenvolvimento Regional

(página intencionalmente deixada em branco)

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

(página intencionalmente deixada em branco)

Agradecimentos

Esta dissertação marca o final de um longo e muitas vezes difícil, mas sempre desafiante, percurso. Durante esse percurso, fui aluna por 5 anos no Instituto Superior Técnico (IST), onde aprendi muito a todos os níveis e trabalhei arduamente e com dedicação. Este percurso teve como último desafio o desenvolvimento da minha dissertação de mestrado, que, apesar de ser um trabalho individual, foi um desafio superado com sucesso graças ao apoio de várias pessoas. Assim, aproveito esta secção para agradecer do fundo do coração a todos os que de uma maneira ou de outra contribuíram para a conclusão desta dissertação.

Primeiramente, quero agradecer profundamente aos meus orientadores, Professor Doutor João Ramôa Correia e Doutor Mário Garrido, pelos excelentes profissionais que são e por todo o conhecimento que me transmitiram, permitindo-me, assim, estar um passo mais próximo de ser uma excelente engenheira. A vossa orientação, dedicação, apoio e prontidão, mas também a simpatia sempre presente, foram um exemplo para mim e motivaram-me a dar sempre o meu melhor. Foi uma honra e um prazer poder trabalhar convosco.

O meu sincero agradecimento à Doutora Susana Cabral da Fonseca do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), pela sua simpatia e pelo seu apoio na concretização dos ensaios de Análise Mecânica Dinâmica (DMA).

Ao Tarikul Hasan, aluno de doutoramento que continuará a desenvolver o projeto em que esta dissertação está inserida, o meu especial obrigado por todo o conhecimento teórico e experimental transmitido. Agradeço também a sua constante disponibilidade para ajudar com dúvidas e trocar ideias, bem como pela sua sempre simpática personalidade. A forma como em conjunto superámos todas as dificuldades encontradas durante a campanha experimental e a constante vontade de fazer mais e melhor, fez de nós uma SuperEquipa (*SuperTeam*).

À Inês Rosa, ou como muitos possam conhecer como “a minha amiga do doutoramento”, que agora é já uma doutorada de sucesso, um obrigada não chega para agradecer tudo o que fez por mim e pelo bem desta dissertação. A partilha de conhecimento, o conselho mais simples, ou mesmo as trocas de chocolates são alguns exemplos que ajudaram a que este percurso final fosse mais leve e bonito, tudo graças à sua companhia. Guardarei para sempre e com muito carinho a nossa amizade. A todos os restantes membros do CORE Group do IST, o meu agradecimento por me fazerem sentir como uma de vós desde o primeiro dia.

Também do IST, gostaria de agradecer a todos os técnicos do Laboratório de Estruturas e Resistência de Materiais (LERM), os quais ajudaram no desenvolvimento da campanha experimental, pela sua perícia e engenho demonstrados em laboratório. Um especial agradecimento ao Sr. Fernando Alves, pela sua constante boa disposição e sentido de humor, os quais irei para sempre recordar.

Quero também agradecer à “Trimarine Compósitos, Lda”, empresa parceira que produziu os materiais necessários para a campanha experimental e que permitiu o desenvolvimento desta dissertação de mestrado.

A todas as minhas amigas e amigos, os quais não irei nomear, mas que sei que saberão quem são, o meu sentido obrigada por terem estado sempre disponíveis para mim, nos momentos bons mas, principalmente, nos mais difíceis. A vossa amizade, o apoio incondicional e a alegria constante foram cruciais para aqui chegar.

Por fim, nenhuma palavras serão suficientes para agradecer o apoio da minha família. À minha mãe, ao meu pai e à minha irmã, a vossa existência, o amor e valores que me transmitiram, fizeram de mim a Bia que hoje sou. Obrigada por acreditarem sempre em mim e me motivarem a ser melhor cada dia. Ao meu Diogo, por todo o apoio, carinho, paciência e amor que teve sempre de sobra para me dar, um obrigada de coração. Sei o quanto estão orgulhosos de mim e, por isso, esta dissertação é para vocês.

Resumo

O desenvolvimento da Engenharia Civil tem passado pela evolução das técnicas de construção e pela introdução de novos materiais. Um exemplo disso são os materiais compósitos de polímeros reforçados com fibras (FRP), que têm vindo a ser utilizados em diversas aplicações da construção, substituindo os materiais convencionais. No entanto, a informação existente sobre os FRP, em particular sobre a sua durabilidade, é ainda escassa e inconsistente, refletindo-se na falta de modelos de previsão e na falta de regulamentação.

A presente dissertação apresenta os resultados de um estudo experimental sobre a durabilidade em ambientes higrotérmicos de dois tipos de compósitos de polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP), produzidos por infusão a vácuo com duas resinas diferentes - poliéster insaturado e viniléster.

Para este estudo, os laminados de GFRP foram imersos em água a 20 °C, 40 °C e 60 °C, por 3 e 6 meses. Ao fim daqueles períodos, foram avaliados os efeitos do envelhecimento higrotérmico nas propriedades termomecânicas e mecânicas de ambos os laminados, ensaiados em estado húmido e seco. Em particular, foram realizados os seguintes ensaios: análises mecânicas dinâmicas (DMA), e ensaios de tração, compressão, flexão, corte no plano e corte interlaminar.

A análise dos resultados obtidos após o envelhecimento dos GFRP em estudo permitiu concluir que as propriedades termomecânicas sofreram uma degradação pouco significativa. Relativamente às propriedades mecânicas, a degradação foi muito mais significativa e aumentou com a temperatura de imersão, sendo mais notória em propriedades maioritariamente dominadas pela matriz. Após secagem, a recuperação das propriedades foi ligeira, principalmente para as temperaturas de imersão mais elevadas, traduzindo uma degradação de carácter irreversível. No entanto, nalguns casos, observou-se uma recuperação da degradação (e até melhoria das propriedades), refletindo degradação reversível e pós-cura, principalmente em propriedades dominadas pela matriz. Em geral, a maior degradação ocorreu durante os primeiros 3 meses, tendo-se registado uma redução da taxa de degradação entre os 3 e os 6 meses de exposição. De uma maneira geral, os provetes constituídos por resina de viniléster apresentaram melhor desempenho em termos de envelhecimento higrotérmico do que os constituídos por resina de poliéster.

Palavras-chave: Materiais Compósitos, Polímero Reforçado com Fibra de Vidro (GFRP), Infusão a Vácuo, Envelhecimento Higrotérmico, Durabilidade, Propriedades Termomecânicas e Mecânicas.

(página intencionalmente deixada em branco)

Abstract

The development of Civil Engineering has involved the evolution of construction techniques and the introduction of new materials. An example of this are fibre reinforced polymer (FRP) composites, which have been used in various construction applications, replacing conventional materials. However, existing information on FRP, in particular, on their durability, is still scarce and inconsistent, which is reflected in the lack of predictive models and regulation.

This master thesis presents the results of an experimental study on the durability in hygrothermal environments of two types of glass fibre reinforced polymer (GFRP) composites, produced by vacuum infusion, with two different resins – unsaturated polyester and vinylester.

For this study, the GFRP laminates were immersed in water at 20 °C, 40 °C and 60 °C, for 3 and 6 months. At the end of those periods, the effects of hygrothermal ageing on the thermomechanical and mechanical properties of both laminates, tested in wet and dry conditions, were evaluated. In particular, the following tests were carried out: dynamic mechanical analysis (DMA), and tensile, compressive, flexural, in-plane shear and interlaminar shear tests.

The study of the results obtained after ageing the GFRP laminates allowed to conclude that the thermomechanical properties suffered little degradation. Regarding the mechanical properties, the degradation was much higher and increased with the immersion temperature, being particularly more noticeable in matrix-dominated properties. After drying, the recovery of properties was limited, mainly for the higher immersion temperatures, reflecting irreversible degradation. However, in some cases, more significant recovery (and even improvement) of properties was observed, associated with reversible reactions and post-curing, mainly in matrix-dominated properties. In general, the highest percentage of degradation occurred during the first 3 months, with only a small additional degradation taking place between 3 and 6 months of exposure. In general, specimens made of vinylester resin showed better performance in terms of hygrothermal ageing compared to polyester specimens.

Keywords: Composite Materials, Glass Fibre Reinforced Polymer (GFRP), Vacuum Infusion, Hygrothermal Ageing, Durability, Thermomechanical and Mechanical Properties.

(página intencionalmente deixada em branco)

Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo	iii
Abstract.....	v
Lista de Tabelas	ix
Lista de Figuras	xi
Lista de Acrónimos	xv
Simbologia	xvii
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento geral	1
1.2. Objetivos e metodologia.....	2
1.3. Estrutura da dissertação.....	3
2. Estado da arte	5
2.1. Considerações iniciais.....	5
2.2. Materiais compósitos.....	5
2.2.1. Enquadramento geral.....	5
2.2.2. Contexto histórico	5
2.2.3. Constituição de FRP	6
2.2.4. Estados físicos associados a um aumento de temperatura.....	10
2.2.5. Processos de fabrico	11
2.2.6. Aplicações na construção	12
2.3. Durabilidade	15
2.3.1. Suscetibilidade aos efeitos da humidade	16
2.3.2. Suscetibilidade a efeitos térmicos	21
2.3.3. Suscetibilidade à radiação ultravioleta (UV).....	24
2.3.4. Modelos de previsão da degradação e dimensionamento.....	25
2.4. Considerações finais	29
3. Programa experimental	31
3.1. Considerações iniciais.....	31
3.2. Descrição dos materiais utilizados	31
3.2.1 Fibra de vidro e arquitetura de fibras	31

3.2.2. Resina de poliéster	32
3.2.3. Resina de viniléster	33
3.3. Processo de fabrico dos GFRP	34
3.4. Descrição e preparação dos ambientes de envelhecimento	35
3.5. Corte e preparação dos provetes de GFRP	36
3.6. Resumo dos ensaios realizados durante a campanha experimental	38
3.7. Caracterização mecânica	39
3.7.1. Ensaio de tração	40
3.7.2. Ensaio de compressão	42
3.7.3. Ensaio de corte no plano (losipescu)	44
3.7.4. Ensaio de corte interlaminar	45
3.7.5. Ensaio de flexão	47
3.8. Caracterização termomecânica – ensaio de análise mecânica dinâmica	48
3.9. Considerações finais	50
4. Resultados e discussão	51
4.1. Considerações iniciais	51
4.2. Caracterização de referência - provetes sem envelhecimento (<i>unaged</i>)	51
4.3. Efeito do envelhecimento na resposta termomecânica	55
4.4. Efeito do envelhecimento na resposta mecânica	58
4.4.1. Comportamento à tração	58
4.4.2. Comportamento à compressão	61
4.4.3. Comportamento à flexão	64
4.4.4. Comportamento ao corte no plano	67
4.4.5. Comportamento ao corte interlaminar	69
4.5. Considerações finais	72
5. Conclusões e perspetivas de desenvolvimentos futuros	75
5.1. Conclusões	75
5.2. Perspetivas de desenvolvimentos futuros	77
Referências	81
Anexo A – Provetes de GFRP com poliéster insaturado (UP)	A.1
Anexo B – Provetes de GFRP com viniléster (VE)	A.9

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Propriedades típicas das fibras de vidro-E, adaptado de [2,3,5].	8
Tabela 2 – Propriedades gerais de resinas UP e VE, adaptado de [10].	9
Tabela 3 – A: Características dos tecidos existentes no layup; B: Layup de produção, adaptado de [65,66].....	32
Tabela 4 – Propriedades da resina de poliéster, adaptado de [67].	32
Tabela 5 – Aditivos adotados para a produção (a 25 °C) da resina de viniléster, adaptado de [68]....	33
Tabela 6 – Propriedades da resina de viniléster, adaptado de [68].....	33
Tabela 7 – Informação relativa a cada tipo de ensaio.	38
Tabela 8 – Resumo da campanha experimental realizada para os provetes testados sem envelhecimento (<i>unaged</i>).....	38
Tabela 9 – Resumo da campanha experimental realizada para os provetes envelhecidos no ambiente (1) e no ambiente (2).....	39
Tabela 10 – Propriedades termomecânicas e mecânicas dos perfis de GFRP sem envelhecimento. 54	
Tabela 11 – Quadro resumo dos valores de retenção da resistência (%) para cada tipo de ensaio, no estado saturado.....	72
Tabela 12 – Quadro resumo dos valores de retenção da resistência (%) para cada tipo de ensaio, no estado seco	73

(página intencionalmente deixada em branco)

Lista de Figuras

Figura 1 – Diferentes estados físicos do polímero em função do aumento de temperatura, adaptado de [13].....	11
Figura 2 – Preparação de tabuleiro de ponte em betão reforçado com varões de GFRP, no Canadá, adaptado de [3].....	13
Figura 3 – Aplicações de FRP como reparação ou reforço: (a) mantas de CFRP utilizadas para reforço do Viaduto Duarte Pacheco; (b) instalação de tabuleiro totalmente em FRP, adaptado de [3].	13
Figura 4 – Ponte pedonal híbrida em aço/GFRP em Viseu, Portugal, adaptado de [3].	14
Figura 5 – Estruturas totalmente FRP: (a) Ponte de Pontresina, na Suíça; (b) Ponte de Kolding, na Dinamarca, adaptado de [3].	14
Figura 6 – Evolução da absorção de água para o interior do GFRP em função do tempo, adaptado de [8].....	17
Figura 7 – Dados experimentais das propriedades de GFRP, adquiridos pela pesquisa de Garrido et al. [46].....	27
Figura 8 – Comparação entre os dados experimentais e as previsões a longo prazo: a) até 14 anos; b) até 100 anos [46].....	28
Figura 9 – Teste de Infusão: (a) início da impregnação da resina; (b) fibras totalmente saturadas em resina.	34
Figura 10 – Aspetto final de um painel de GFRP de grandes dimensões.	35
Figura 11 – Placas de GFRP: (a) esquema de corte; (b) resultado após corte na CNC.....	37
Figura 12 – Ensaio de tração: (a) representação esquemática do provete e sua geometria; (b) imagem real de um provete.....	41
Figura 13 – Ensaio de compressão - imagem real do mecanismo de testagem.	42
Figura 14 – Ensaio de compressão: (a) representação esquemática do provete e sua geometria; (b) imagem real de um provete.....	43
Figura 15 – Ensaio de corte no plano (Iosipescu): (a) representação esquemática do provete e sua geometria; (b) imagem real do mecanismo de testagem.	44
Figura 16 – Ensaio de corte no plano (Iosipescu): (a) rotura do provete por esmagamento das faces laterais; (b) provete reforçado com tabs.....	45
Figura 17 – Ensaio de corte interlaminar: (a) representação esquemática do mecanismo de testagem; (b) imagem real do mecanismo de testagem.	46
Figura 18 – Ensaio de corte interlaminar: (a) representação esquemática do provete e sua geometria; (b) imagem real de um provete.	46
Figura 19 – Ensaio de flexão: (a) representação esquemática do mecanismo de testagem; (b) imagem real do mecanismo de testagem; (c) representação esquemática do provete e sua geometria; (d) imagem real de um provete.....	47
Figura 20 – Ensaio de DMA: (a) representação esquemática do provete e sua geometria; (b) imagem real de um provete.....	49
Figura 21 – Curvas representativas do ensaio de DMA para os provetes de UP e VE sem envelhecimento.	52

Figura 22 – Curvas representativas do comportamento mecânico para os diferentes ensaios: (a) tração; (b) compressão; (c) corte no plano; (d) corte interlaminar; (e) flexão.....	53
Figura 23 – Modos de rotura observados nos diferentes ensaios mecânicos: (a) tração; (b) e (c) compressão; (d) flexão; (e) corte no plano; (f) corte interlaminar.....	54
Figura 24 – Curvas DMA para imersão em água a diferentes temperaturas e períodos: a 20 °C para perfis (a) UP e (b) VE; a 40 °C para perfis (c) UP e (d) VE; a 60 °C para perfis (e) UP e (f) VE.....	56
Figura 25 – Variação da temperatura de transição vítreia, T_g “on set”, para os diferentes ambientes de envelhecimento e perfis: (a) UP; (b) VE.....	57
Figura 26 – Curvas de tensão vs. deformação do ensaio tração, para diferentes períodos de envelhecimento em imersão em água a 60 °C: perfil (a) UP e (b) VE.....	59
Figura 27 – Variação da resistência à tração, para os diferentes ambientes de envelhecimento e perfis: (a) UP e (b) VE.....	59
Figura 28 – Variação do módulo à tração, para os diferentes ambientes de envelhecimento e perfis: (a) UP e (b) VE.....	61
Figura 29 – Curvas de tensão vs. deformação do ensaio à compressão, para diferentes períodos de envelhecimento em imersão em água a 60 °C: perfil (a) UP e (b) VE.....	62
Figura 30 – Variação da resistência à compressão, para os diferentes ambientes de envelhecimento e perfis: (a) UP e (b) VE.....	62
Figura 31 – Variação do módulo de elasticidade à compressão, para os diferentes ambientes de envelhecimento e perfis: (a) UP e (b) VE.....	63
Figura 32 – Curvas de tensão vs. deformação do ensaio flexão, para diferentes períodos de envelhecimento em imersão em água a 60 °C: perfil (a) UP e (b) VE.....	65
Figura 33 – Variação da resistência à flexão, para os diferentes ambientes de envelhecimento e perfis: (a) UP e (b) VE.....	65
Figura 34 – Curvas de tensão vs. deformação por corte no plano, para diferentes períodos de envelhecimento em imersão em água a 60 °C: perfil (a) UP e (b) VE.....	67
Figura 35 – Variação da resistência ao corte no plano, para os diferentes ambientes de envelhecimento e perfis: (a) UP e (b) VE.....	67
Figura 36 – Variação do módulo de distorção por corte no plano, para os diferentes ambientes de envelhecimento e perfis: (a) UP e (b) VE.....	69
Figura 37 – Curvas de tensão vs. deslocamento a meio vão do ensaio de corte interlaminar, para diferentes períodos de envelhecimento em imersão em água a 60 °C: perfil (a) UP e (b) VE.....	70
Figura 38 – Variação da resistência ao corte interlaminar, para os diferentes ambientes de envelhecimento e perfis: (a) UP e (b) VE.....	70
Figura A.1 – Curvas de tensão vs. deformação do ensaio tração e respetivos valores obtidos dos provetes: a) sem envelhecimento; b) W20 3m; c) W20 3m D; d) W20 6m; e) W40 3m; f) W40 3m D.....	A.1
Figura A.2 – Curvas de tensão vs. deformação do ensaio tração e respetivos valores obtidos dos provetes: a) W40 6m; b) W60 3m; c) W60 3m D; d) W60 6m.....	A.2

Figura A.3 – Curvas de tensão vs. deformação do ensaio à compressão e respetivos valores obtidos dos provetes: a) sem envelhecimento; b) W20 3m.....	A.2
Figura A.4 – Curvas de tensão vs. deformação do ensaio à compressão e respetivos valores obtidos dos provetes: a) W20 3m D; b) W20 6m; c) W40 3m; d) W40 3m D; e) W40 6m; f) W60 3m.....	A.3
Figura A.5 – Curvas de tensão vs. deformação do ensaio à compressão e respetivos valores obtidos dos provetes: a) W60 3m D; b) W60 6m.....	A.4
Figura A.6 – Curvas de tensão vs. deslocamento a meio vão do ensaio flexão e respetivos valores obtidos dos provetes: a) sem envelhecimento; b) W20 3m; c) W20 3m D; d) W20 6m.	A.4
Figura A.7 – Curvas de tensão vs. deslocamento a meio vão do ensaio flexão e respetivos valores obtidos dos provetes: a) W40 3m; b) W40 3m D; c) W40 6m; d) W60 3m; e) W60 3m D; f) W60 6m.	A.5
Figura A.8 – Curvas de tensão vs. deformação por corte no plano e respetivos valores obtidos dos provetes: a) sem envelhecimento; b) W20 3m; c) W20 6m; d) W40 3m; e) W40 3m D; f) W40 6m. ..	A.6
Figura A.9 – Curvas de tensão vs. deformação por corte no plano e respetivos valores obtidos dos provetes: a) W60 3m; b) W60 3m D; d) W60 6m.	A.7
Figura A.10 – Curvas de tensão vs. deslocamento a meio vão do ensaio de corte interlaminar e respetivos valores obtidos dos provetes: a) sem envelhecimento; b) W20 3m; c) W20 3m D.	A.7
Figura A.11 – Curvas de tensão vs. deslocamento a meio vão do ensaio de corte interlaminar e respetivos valores obtidos dos provetes: a) W20 6m; b) W40 3m; c) W40 3m D; d) W40 6m; e) W60 3m; f) W60 3m D.	A.8
Figura A.12 – Curvas de tensão vs. deslocamento a meio vão do ensaio de corte interlaminar e respetivos valores obtidos dos provetes: a) W60 6m.	A.9
Figura A.13 – Curvas de tensão vs. deformação do ensaio tração e respetivos valores obtidos dos provetes: a) sem envelhecimento; b) W20 3m; c) W20 3m D; d) W20 6m.	A.9
Figura A.14 – Curvas de tensão vs. deformação do ensaio tração e respetivos valores obtidos dos provetes: a) W40 3m; b) W40 3m D; c) W40 6m; d) W60 3m; e) W60 3m D; f) W60 6m.	A.10
Figura A.15 – Curvas de tensão vs. deformação do ensaio à compressão e respetivos valores obtidos dos provetes: a) Sem envelhecimento; b) W20 3m; c) W20 3m D; d) W20 6m; e) W40 3m; f) W40 3m D.	A.11
Figura A.16 – Curvas de tensão vs. deformação do ensaio à compressão e respetivos valores obtidos dos provetes: a) W40 6m; b) W60 3m; c) W60 3m D; d) W60 6m.	A.12
Figura A.17 – Curvas de tensão vs. deslocamento a meio vão do ensaio flexão e respetivos valores obtidos dos provetes: a) Sem envelhecimento; b) W20 3m.	A.12
Figura A.18 – Curvas de tensão vs. deslocamento a meio vão do ensaio flexão e respetivos valores obtidos dos provetes: a) W20 3m D; b) W20 6m; c) W40 3m; d) W40 3m D; e) W40 6m; f) W60 3m.	A.13
Figura A.19 – Curvas de tensão vs. deslocamento a meio vão do ensaio flexão e respetivos valores obtidos dos provetes: a) W60 3m D; b) W60 6m.	A.14
Figura A.20 – Curvas de tensão vs. deformação por corte no plano e respetivos valores obtidos dos provetes: a) sem envelhecimento; b) W20 3m; c) W20 6m; d) W40 3m.	A.14

Figura A.21 – Curvas de tensão vs. deformação por corte no plano e respetivos valores obtidos dos provetes: a) W40 3m D; b) W40 6m; c) W60 3m; d) W60 3m D; e) W60 6m.	A.15
Figura A.22 – Curvas de tensão vs. deslocamento a meio vão do ensaio de corte interlaminar e respetivos valores obtidos dos provetes: a) Sem envelhecimento.	A.15
Figura A.23 – Curvas de tensão vs. deslocamento a meio vão do ensaio de corte interlaminar e respetivos valores obtidos dos provetes: a) W20 3m; b) W20 3m D; c) W20 6m; d) W40 3m; e) W40 3m D; f) W40 6m.	A.16
Figura A.24 – Curvas de tensão vs. deslocamento a meio vão do ensaio de corte interlaminar e respetivos valores obtidos dos provetes: a) W60 3m; b) W60 3m D; c) W60 6m.	A.17

Lista de Acrónimos

ASCE	<i>American Society of Civil Engineers</i> (Sociedade Americana de Engenheiros Civis)
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Desenho Assistido por Computador)
CERF	<i>Civil Engineering Research Foundation</i> (Fundação para a Investigação em Engenharia Civil)
CFRP	<i>Carbon Fibre Reinforced Polymer</i> (Polímero Reforçado com Fibra de Carbono)
CNC	<i>Computer Numeric Control</i> (Controlo Numérico Computadorizado)
CoV	Coeficiente de Variação
CSM	<i>Chopped Strand Mat</i>
DECivil	Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos
DMA	<i>Dynamic Mechanical Analysis</i> (Análise Mecânica Dinâmica)
EPS	Poliestireno Expandido
FRP	<i>Fibre Reinforced Polymer</i> (Polímero Reforçado com Fibra)
GFRP	<i>Glass Fibre Reinforced Polymer</i> (Polímero Reforçado com Fibra de Vidro)
HDT	<i>Heat Deflection Temperature</i> (Temperatura de Deflexão Térmica)
ILSS	<i>Interlaminar Shear Stress</i> (Corte Interlaminar)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional de Normalização)
IST	Instituto Superior Técnico
IP	<i>In-Plane Shear</i> (Corte no Plano)
LERM	Laboratório de Estruturas e Resistência de Materiais
MDF	<i>Medium Density Fibreboard</i> (Placa de Fibra de Média Densidade)
MEKP	<i>Methyl Ethyl Ketone Peroxide</i> (Peróxido de Metiletilcetona)
UA	<i>Unaged</i> (Sem Envelhecimento)
UP	<i>Unsaturated Polyester</i> (Poliéster Insaturado)
UV	Ultravioleta
VARTM	Moldagem por Transferência de Resina Assistida por Vácuo
VE	Viniléster

(página intencionalmente deixada em branco)

Simbologia

Símbolos latinos – Definição

a_d	Valor de cálculo dos parâmetros geométricos
A_0	Área da secção transversal inicial do provete
b	Largura do provete
D	Diâmetro do filamento
E	Módulo de elasticidade/Módulo de Young
E'	Módulo de armazenamento
E''	Módulo de perda
E_c	Módulo de elasticidade em compressão
E_f	Módulo de elasticidade em flexão
E_t	Módulo de elasticidade em tração
F_{Ed}	Valor de cálculo das ações (Modelo de Arrhenius)
F_t	Força máxima em tração
F_c	Força máxima em compressão
F	Força máxima de corte (interlaminar)
F_i	Força máxima de corte (Iosipescu)
G	Módulo de distorção
h	Espessura do provete
L	Comprimento do vão
L_0	Distância inicial entre pontos-alvo ou comprimento de referência do provete
L_f	Distância final entre pontos-alvo
M_t	Massa para o instante t
M_∞	Massa a tempo infinito
R_d	Valor de cálculo da resistência
$R\{\dots\}$	Valor associado ao modelo de resistência para um determinado modo de rotura
R^2	Coeficiente de regressão
R	Raio
s	Flecha ou deslocamento a meio vão
T_g	Temperatura de transição vítreia
T_d	Temperatura de decomposição

Símbolos gregos – Definição

σ_{ult}	Resistência à tração das fibras de vidro-E
α	Coeficiente de expansão térmica
η_{cm}	Fator de conversão para a humidade
η_{ct}	Fator de conversão para a temperatura
η_c	Fator de conversão global
γ_{Rd}	Fator parcial associado à incerteza do modelo de resistência
$\eta_{c,i}$	Fator de conversão que traduz os efeitos da temperatura e humidade numa propriedade i
$X_{k,i}$	Valor característico da propriedade do material i
$\gamma_{m,i}$	Fator parcial que contabiliza a variabilidade de uma dada propriedade do material i
σ_t	Resistência à tração
σ_c	Resistência à compressão
σ_c'' ; σ_c'	Valores de tensão de compressão obtidos da parte linear da curva tensão-deformação
σ_f	Resistência à flexão
σ_{sbs}	Tensão de corte interlaminar
σ_2 ; σ_1	Valores de tensão de tração obtidos da parte linear da curva tensão-deformação
ε_t	Extensão de rotura em tração
ε_c	Deformação (extensão) de rotura em compressão
$\varepsilon_{\pm 45}$	Extensão de rotura segundo direções orientadas a +/- 45°
ε_2 ; ε_1	Valores de deformação à tração definidos à priori
ε_c'' ; ε_c'	Valores de deformação à compressão definidos à priori
Δ	Variação
ΔL_0	Variação do comprimento existente entre os pontos alvos
τ	Resistência ao corte no plano (Iosipescu)
τ_2 ; τ_1	Tensões de corte obtidas de dois pontos previamente definidos
$\tau_{interlam}$	Tensão de corte interlaminar
γ	Distorção na rotura
δ	Ângulo de fase
$\tan \delta$	Fator de perda
ρ	Densidade

1. Introdução

1.1. Enquadramento geral

No decorrer dos últimos 200 anos, o campo das tecnologias e materiais de construção tem experienciado rápidos avanços e desenvolvimentos, permitindo aos engenheiros civis construir com maiores níveis de segurança e ganhos económicos. Desta maneira, foi possível alcançar uma maior funcionalidade das infraestruturas construídas, tendo em conta as necessidades comuns da sociedade, melhorando, consequentemente, a qualidade de vida dos indivíduos [1].

Um tipo de material que é exemplo deste desenvolvimento são os materiais compósitos de polímeros reforçados com fibras (*fiber reinforced polymer - FRP*). Este tipo de material é constituído por, pelo menos, dois materiais diferentes que, quando combinados e mantendo uma superfície de interface identificável, originam um material com características e desempenho superiores [2]. A primeira utilização de um material FRP, tal como são conhecidos atualmente (reforço fibroso embebido numa matriz polimérica), remonta a 1940, mas, apenas a partir do final da década de 1980 é que estes materiais começaram a ser adotados pelos engenheiros civis para a construção de infraestruturas [1]. Algumas das razões que justificam a crescente procura e utilização dos materiais compósitos são as seguintes: reduzido peso-próprio; elevada resistência e rigidez; elevada resistência à fadiga; isolamento térmico; transparência eletromagnética; facilidade de produção em qualquer formato; reduzidos custos de manutenção; elevada resistência à corrosão; e boa durabilidade a longo prazo [3]. Face a estas características, os FRP têm vindo a ser largamente utilizados em diversas aplicações, tais como: varões de reforço; cabos de pré-esforço; mantas para reforço de colunas; laminados para reforço colado exterior de paredes, vigas e lajes; tabuleiros de pontes total ou parcialmente compostos por FRP; ou outras estruturas totalmente constituídas por este tipo de materiais. Desde que corretamente dimensionados e fabricados, em certas aplicações, os materiais compósitos podem apresentar vidas úteis em serviço superiores e custos de manutenção inferiores, por comparação aos materiais tradicionais, como o betão, o aço e a madeira, tornando-se uma alternativa muito competitiva a estes [4].

Com o aumento da utilização deste material na construção, surgiu a necessidade de desenvolver recomendações e normas de dimensionamento (Eurocódigos) que os engenheiros projetistas pudessem utilizar durante a fase de dimensionamento deste tipo de infraestruturas [5]. Este é precisamente um dos pontos mais críticos aquando da escolha de materiais compósitos FRP para a construção, pois sendo as estruturas de engenharia civil dimensionadas para vidas úteis de 50 anos ou mais (no caso das pontes, em muitos casos, 100 anos) e não sendo ainda possível definir, com certeza, como é que este tipo de materiais se irão degradar a longo prazo, a escolha de compósitos FRP como material estrutural é, muita das vezes, colocada de lado. A situação referida advém do facto de existir uma escassez de dados e modelos de previsão relativos à durabilidade deste material em serviço, sendo que os dados existentes, para além de escassos são, muitas vezes, contraditórios e de difícil acesso à maioria dos engenheiros [4]. Em particular, a maior parte da informação disponível refere-se à durabilidade de compósitos FRP produzidos por pultrusão, existindo muito menos informação para outros processos de produção, como a infusão a vácuo.

Assim, é fundamental estudar as diferentes propriedades inerentes aos compósitos FRP, bem como entender a sua degradação a longo prazo para diferentes ambientes de exposição, com o intuito de adquirir dados válidos, importantes para o correto dimensionamento e aplicação do material em aplicações da engenharia civil [6]. Posto isto, a presente dissertação inclui um estudo sobre a durabilidade de dois tipos diferentes de compósitos FRP, produzidos com duas resinas diferentes por infusão a vácuo, tendo em vista a avaliação da degradação das suas características mecânicas e termomecânicas quando expostos a ambientes de envelhecimento higrotérmicos e térmicos.

1.2. Objetivos e metodologia

A escassez de informação relativa à durabilidade dos FRP no contexto da engenharia civil é, como referido, um dos principais impedimentos a uma maior aceitação e utilização deste material neste sector. A grande maioria dos ensaios e dados válidos sobre a degradação e desempenho dos FRP diz respeito a situações de relativamente curto prazo, não havendo dados válidos disponíveis sobre a sua durabilidade para horizontes temporais maiores, tendo em conta os tempos de vida útil típicos (50 a 100 anos). Para além do referido, os dados disponíveis sobre as propriedades dos compósitos apresentam uma grande variabilidade, uma vez que são influenciados por diversos fatores, como por exemplo: (i) método de teste de durabilidade utilizado (e.g. tipo de ambiente de exposição); (ii) condições de teste (e.g. temperatura, humidade, tipo de provete e suas dimensões); (iii) variação dos constituintes do FRP (e.g. tipo de resina e fibras, percentagem e arquitetura das fibras, aditivos, condições de cura); (iv) processos de fabrico [6].

Esta lacuna nos dados sobre a durabilidade de compósitos para construção foi destacada pela Fundação para a Investigação em Engenharia Civil (*Civil Engineering Research Foundation - CERF*), que identificou a necessidade de estudar a durabilidade destes materiais quando expostos à humidade, à temperatura, a soluções alcalinas, à radiação UV e ao fogo – este aspeto foi identificado como sendo o mais premente e com maior necessidade de estudos futuros [6].

A presente dissertação foi realizada no âmbito do projeto “Durable-FRP”, financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, desenvolvido numa colaboração entre o Instituto Superior Técnico (CORE Group), o Laboratório Nacional de Engenharia Civil e a Universidade do Minho. O principal objetivo do projeto é complementar a base de dados e bibliografia existentes sobre a durabilidade dos FRP com referências técnicas atuais e uma campanha de ensaios experimentais, devidamente validados. Os FRP escolhidos como objeto de estudo da presente dissertação foram dois materiais compósitos reforçados com fibra de vidro (*glass fiber reinforced polymer - GFRP*), produzidos por infusão a vácuo e constituídos por duas matrizes poliméricas distintas – poliéster insaturado e viniléster - e contendo o mesmo reforço de fibra de vidro. Os materiais referidos foram testados no seu estado original (não envelhecido) e também após um processo de envelhecimento higrotérmico e térmico (separadamente) de forma artificial e acelerada. Contudo, na presente dissertação apenas foram analisados os efeitos relativos à degradação higrotérmica nos GFRP em estudo, tendo-se caracterizado as propriedades destes materiais do ponto de vista termomecânico e mecânico.

No âmbito do projeto “Durable-FRP”, a campanha laboratorial consistiu em introduzir os diversos laminados de GFRP em tanques de água a três temperaturas diferentes (20, 40 e 60 °C) durante períodos pré-definidos (3, 6, 12 e 24 meses, 5, 10 e 20 anos). O estudo experimental destes compósitos irá permitir avaliar a degradação termomecânica, através de análises mecânicas dinâmicas (*Dynamic Mechanical Analysis - DMA*), e a degradação mecânica, através de ensaios de tração, compressão, flexão, corte no plano e corte interlaminar. Nesta dissertação serão abordados os resultados obtidos na caracterização dos GFRP após 3 e 6 meses de envelhecimento higrotérmico. É de referir que, em qualquer um destes ambientes, os materiais foram testados quer no estado húmido, quer depois de terem sido submetidos a um processo de secagem; tal teve por objetivo avaliar a reversibilidade (por secagem) de alguns dos fenómenos de degradação devido ao envelhecimento higrotérmico.

1.3. Estrutura da dissertação

A estrutura da presente dissertação divide-se em cinco capítulos, sendo o primeiro o capítulo da introdução, onde este texto se insere. Neste capítulo, enquadrou-se de forma geral o tema da dissertação, identificando-se os principais problemas que motivaram a sua realização, os objetivos e a metodologia geral adotada. Neste capítulo, nomeadamente nos parágrafos seguintes, é ainda feita uma breve descrição dos restantes capítulos.

O segundo capítulo é referente ao estado da arte, em que é feito um resumo geral e abrangente do conhecimento até aqui publicado sobre os compósitos FRP e a sua durabilidade, estando este dividido em duas secções importantes. Na primeira secção, apresenta-se (i) um enquadramento geral, com contextualização histórica dos FRP, (ii) identificam-se os diferentes constituintes dos materiais compósitos, dando-se ênfase às suas propriedades físicas e químicas, (iii) descrevem-se as alterações físicas ocorridas com a variação da temperatura, (iv) referem-se os diversos processos de fabrico para produção destes materiais e (v) apresentam-se as suas principais aplicações na construção. Na segunda parte, é dado maior foco ao estudo da durabilidade associada aos materiais compósitos, descrevendo-se estudos anteriores referentes à sua suscetibilidade higrotérmica, térmica e a outros efeitos. No fim deste capítulo, são ainda explicados os principais modelos utilizados para previsão da degradação higrotérmica e dimensionamento, em termos de durabilidade, dos FRP.

O terceiro capítulo é referente à apresentação do programa experimental adotado para a concretização da campanha laboratorial do projeto “Durable-FRP”, em que esta dissertação se insere. Ao longo do capítulo, apresenta-se uma descrição detalhada dos materiais constituintes dos laminados utilizados e, de seguida, descreve-se o processo de produção dos laminados e como se efetuaram os cortes e a preparação dos provetes. O capítulo prossegue com a explicação dos ambientes de envelhecimento e a forma como estes foram preparados, terminando com a apresentação dos diferentes ensaios mecânicos e termomecânicos de caracterização dos materiais GFRP.

No quarto capítulo, discutem-se os resultados obtidos, interpretando-se cuidadosamente cada uma das tendências encontradas. Este capítulo subdivide-se numa caracterização denominada de referência, onde serão expostas as características do material num estado virgem, e numa caracterização após envelhecimento. Para ambas, são apresentados, discutidos e comparados os resultados obtidos para

os ensaios termomecânico (DMA) e mecânicos (tração, compressão, flexão, corte no plano e corte interlaminar).

No quinto e último capítulo, apresentam-se as principais conclusões obtidas com a concretização da presente dissertação e sugerem-se algumas perspetivas para estudos futuros neste domínio, tendo em vista o desenvolvimento e aumento da aplicação deste tipo de materiais.

2. Estado da arte

2.1. Considerações iniciais

No presente capítulo, apresenta-se uma revisão geral do estado da arte relativo a materiais compósitos de polímeros reforçados com fibras (*Fiber Reinforced Polymer* – FRP), dividido em duas secções principais. A primeira é referente aos FRP propriamente ditos, sendo abordadas temáticas como a sua contextualização histórica; a sua constituição e propriedades; os estados físicos associados à temperatura; o processo de fabrico usado para o material em estudo; e as suas aplicações na construção. Na segunda secção, é dado especial ênfase aos processos de degradação destes materiais e à maneira como a sua durabilidade é afetada por fatores como a humidade, a temperatura, ou outros fatores relevantes; no final desta secção, apresenta-se ainda um levantamento dos modelos de degradação desenvolvidos até à data. O capítulo termina com algumas considerações finais.

2.2. Materiais compósitos

2.2.1. Enquadramento geral

Em termos genéricos, um material compósito resulta da combinação de dois ou mais materiais, os quais se apresentam mecânica e macroscopicamente separáveis e com composições químicas distintas [2]. Desta maneira, os FRP são um tipo de material compósito que resulta da impregnação de um reforço em fibra (p. ex. vidro, carbono, basalto ou aramida) numa matriz polimérica (p. ex. poliéster, viniléster ou epóxi), sendo que estes componentes, quando usados em separado, têm um desempenho estrutural limitado [3]. Assim, é gerado um produto final que tira partido das melhores características de cada componente, originando um material com propriedades diferentes, no entanto, melhoradas face aos seus constituintes individuais [7]. Estas propriedades são conseguidas combinando a matriz polimérica, que une o material como um todo e contribui para a resistência a danos físicos e a ataques químicos, com as fibras, que conferem maior resistência e rigidez (principalmente) na direção em que se desenvolvem [2].

2.2.2. Contexto histórico

Os FRP são materiais que, devido às suas propriedades mecânicas e por apresentarem uma durabilidade elevada em ambientes mais agressivos, têm sido utilizados em certas indústrias com requisitos específicos, tendo estas também contribuído para o seu desenvolvimento [8].

Correia [3] apresenta uma súmula histórica da evolução dos FRP ao longo do último século. De acordo com este autor, os primeiros registos da aplicação deste tipo de materiais datam a 1930, quando estes foram utilizados para a construção do casco de uma embarcação. Na década de 1940, a utilização de materiais FRP estava intimamente relacionada com a indústria da defesa para aplicações de carácter naval e aeroespacial. A partir de 1948, a sua aplicação generalizou-se a diferentes campos, desde plataformas *off-shore*, redes de distribuição de água, estações elétricas, e também às indústrias química e do papel. Apenas nas décadas de 1950 e 1960 é que se começou a notar interesse na aplicação deste material na construção civil, associada à construção modular. No entanto, esta aplicação incluía somente as fachadas e, por isso, apresentava uma importância secundária nos

projetos, sendo a estrutura primária dos edifícios materializada com materiais tradicionais [9]. Nas décadas de 1950 e 1960, a indústria automóvel passaria a ser a principal consumidora de FRP, introduzindo estes materiais nos seus componentes [3]. Na década de 1970, começaram a ser desenvolvidas fibras com maior resistência e rigidez e menor densidade, e estas passaram a ser comercializadas para atingir os elevados padrões e necessidades da indústria aeroespacial e aeronáutica [1]. Apesar destes desenvolvimentos, a aplicação de materiais compósitos era ainda limitada e dispendiosa e, por isso, apenas aplicada dentro de pequenos nichos em certas indústrias. No entanto, a crise energética que se desencadeou em 1970, em conjunto com o aparecimento de novos processos de produção, nomeadamente a pultrusão, permitiu diminuir os custos de produção (e aquisição) destes materiais, abrindo portas ao aumento da sua utilização. Esta redução de custos ocorreu numa altura crítica para a construção civil, em que a necessidade de renovação de estruturas era cada vez mais urgente, devido a problemas de corrosão de construções metálicas e em betão armado. Desta maneira, a conjugação dos vários aspetos referidos, contribuíram para uma elevada aceitação e reintrodução dos compósitos FRP na engenharia civil, onde a sua utilização tem aumentado de forma contínua até à atualidade [3].

2.2.3. Constituição de FRP

Como referido, os materiais FRP consistem em uma ou mais fases descontínuas, o reforço, embebidas numa fase contínua, a matriz, originando uma interface identificável entre ambos, que atua como ligação [2]. Em termos gerais, o reforço fibroso confere a maioria da resistência e rigidez ao material, nomeadamente na direção em que se desenvolve; enquanto a matriz, de carácter polimérico, permite a transferência de tensões internas ao longo do reforço, protegendo as fibras de ataques externos provenientes do ambiente envolvente, conferindo uma geometria estável e bem definida ao material [10]. No entanto, a combinação efetiva destes dois elementos depende fortemente da interface fibra-matriz, a qual é particularmente importante para a caracterização e desempenho de um FRP [2].

Para além da resina, a matriz polimérica dos materiais compósitos apresenta ainda elementos adicionais na sua composição, os *fillers* e os aditivos. Os *fillers* contribuem para a redução dos custos finais da produção do produto FRP, podendo também influenciar as propriedades de processamento das resinas, nomeadamente a sua viscosidade; quer os *fillers*, quer os aditivos podem ser utilizados para melhorar o desempenho de certas propriedades, como o comportamento ao fogo, e contribuir para melhorar o processo de produção. Aquilo que os distingue notoriamente é a quantidade utilizada, em comparação ao peso da matriz, correspondente a 1% e 10-30%, respetivamente, para aditivos e *fillers* [5].

2.2.3.1. Fibras

Os compósitos são geralmente classificados com base no tipo de reforço fibroso que os constitui [2,3]. A fase fibrosa consiste em filamentos individuais, com diâmetros na ordem do micrómetro; na maioria dos casos, em engenharia civil, as fibras dos FRP apresentam um comprimento indeterminadamente longo e, por isso, são denominadas de contínuas. A percentagem de fibras contínuas presentes no volume de um FRP pode variar entre 20% e 60% [5]. Este reforço fibroso tem como principal função

suportar as solicitações mecânicas impostas ao material compósito, conferindo resistência e rigidez ao longo da direção em que se desenvolve (direção da fibra) [3].

As fibras unidireccionais são as mais utilizadas, sendo produzidas na forma de “camada única” (*single layer or yarn*). Para além disso, as fibras podem também ser contínuas ou descontínuas, ambas utilizáveis para a produção de compósitos. A resistência e módulos dos FRP produzidos com fibras contínuas são, geralmente, superiores aos com fibras descontínuas. Por norma, designa-se por “filamento” uma fibra contínua individual, enquanto a um conjunto de filamentos combinados entre si se atribui o termo *strand*, ou seja, “mecha de fios”. É possível combinar *strands* de diversas formas, produzindo diferentes tipos de elementos de reforço. Um destes tipos é a apresentação do reforço fibroso em mantas (*mats*) ou tecidos (*fabrics*); ao contrário dos elementos constituídos por fibras unidireccionais, as mantas e os tecidos conferem rigidez e resistência em diferentes direções [6].

Existem vários materiais a partir dos quais é possível produzir um reforço fibroso com propriedades estruturais, sendo os mais frequentemente utilizados para aplicações comerciais as fibras de vidro, carbono e aramida [3] (nos anos mais recentes, as fibras de basalto têm tido um crescimento na sua utilização). No entanto, dos vários tipos de fibras enunciados, será dado um maior destaque às fibras de vidro, por serem um dos principais constituintes do objeto de estudo desenvolvido nesta dissertação.

As fibras de vidro são o tipo de reforço fibroso mais frequentemente utilizado na indústria da construção, consequência da sua elevada resistência e custo relativamente reduzido, em conjunto com as características típicas de um material vítreo, como a rigidez, resistência à corrosão, bom isolamento térmico e elétrico, e resistência química. No entanto, apresentam também desvantagens, como o reduzido módulo de elasticidade, a reduzida resistência à abrasão e a fraca adesão à matriz de resina polimérica, especialmente na presença de humidade, requerendo sempre a utilização de um *sizing* adequado [2], como se refere adiante. As fibras de vidro são bastante sensíveis à humidade, principalmente na presença de sais em ambientes alcalinos. Quando submetidas a tensões elevadas por um longo período de tempo, pode ocorrer perda de resistência, tornando-se suscetíveis a rotura por fluência, sendo este um dos principais aspetos a ter em conta aquando da sua aplicação e utilização [5].

As fibras de vidro podem apresentar as seguintes diferentes tipologias, com o objetivo de responderem às exigências das aplicações a que serão sujeitas: vidro-AR, para resistência a ambientes alcalinos; vidro-C, para resistência à corrosão; vidro-E, com propriedades elétricas melhoradas; vidro-S, para elevada resistência e rigidez [2].

De entre as diferentes tipologias de vidro existentes, o vidro-E é o tipo de reforço mais frequentemente utilizado e, também, o utilizado na presente dissertação. Para além das características referidas, este tipo de vidro apresenta reduzido conteúdo em alcalis, elevada durabilidade, reduzida suscetibilidade à humidade, e elevadas propriedades mecânicas, principalmente no que se refere à resistência à tração [2,6]. Na Tabela 1, apresentam-se diferentes propriedades que caracterizam as fibras de vidro do tipo E.

Tabela 1 – Propriedades típicas das fibras de vidro-E, adaptado de [2,3,5].

Propriedades vidro-E	
Massa volúmica, ρ (g/cm ³)	2,54-2,60
Resistência à tração, σ_{ult} (GPa)	2,35-4,60
Módulo de elasticidade, E (GPa)	72,4-88,0
Diâmetro do filamento, d (μ m)	3,0-20,0
Coeficiente de expansão térmica, α ($10^{-6}/^{\circ}$ C)	5,0-6,0
Temperatura máxima de operação ($^{\circ}$ C)	550

Como referido anteriormente, as fibras (de um modo geral) são disponibilizadas com um tratamento químico superficial, denominado *sizing*. Este tratamento previne que o reforço se danifique durante a sua produção e processamento e contribui para que as fibras se mantenham unidas, para além de promover a sua compatibilidade com a matriz polimérica. No caso particular das fibras de vidro, o *sizing* promove também a sua durabilidade, uma vez que atua como protetor à humidade [3].

2.2.3.2. Matriz polimérica

Como referido, a fase contínua e não fibrosa dos materiais compósitos denomina-se por matriz polimérica, que, apesar de não ser a principal responsável pelas propriedades mecânicas do material, desempenha um papel crucial para o desempenho do material compósito. A matriz polimérica apresenta as seguintes principais funções: manter as fibras na posição desejada; transferir a carga ao (e entre) o reforço; impedir a encurvadura das fibras quando solicitadas em compressão; atuar como barreira aos agentes de degradação ambiental. A matriz tem também uma contribuição muito relevante para a rigidez e a resistência ao corte no plano e interlaminar e à compressão do material compósito. Em termos gerais, a matriz polimérica utilizada em compósitos FRP é um material relativamente económico, fácil de processar, com reduzida densidade e elevada resistência química (função do tipo de polímero). No entanto, apresenta reduzida resistência e rigidez (por comparação com as fibras), reduzidas temperaturas máximas de serviço, suscetibilidade à radiação UV e possível redução das suas propriedades mecânicas por absorção de humidade [2]. Para além disso, as resinas poliméricas exibem fluência sob tensões ou cargas permanentes e relaxamento sob deformações ou deslocamentos constantes [5].

Existem diversos tipos de matrizes poliméricas, que podem ser classificadas de acordo com o tipo de polímero, podendo este ser do tipo termoendurecível ou termoplástico. A referida denominação é atribuída como forma de distinguir a ligação das cadeias de ambos os polímeros no estado sólido, bem como a sua reação quando submetidas a um aumento de temperatura. Genericamente, um polímero termoendurecível, quando aquecido, exibe alterações permanentes nas suas cadeias, enquanto um polímero termoplástico apresenta apenas mudanças físicas temporárias [2]. Ao nível molecular, os polímeros termoendurecíveis são reticulados, o que significa que as suas cadeias moleculares formam uma estrutura tridimensional e contínua, fortemente mantida por ligações covalentes. Por outro lado, os polímeros termoplásticos não apresentam reticulação e as ligações que existem entre as suas cadeias moleculares são de “van der Waals” ou de hidrogénio, de fraca atração molecular. Desta maneira, os polímeros terão comportamentos físicos e mecânicos muito diferentes e, após a respetiva

cura, as reações que ocorrem nos polímeros termoendurecíveis serão irreversíveis [5]. Nesta dissertação, apenas se irá desenvolver e dar ênfase aos polímeros termoendurecíveis, por serem o objeto do estudo.

Para além do referido no parágrafo anterior, as resinas termoendurecíveis, por resultarem de reações químicas irreversíveis, após a respetiva cura, não poderão ser fundidas, reprocessadas ou soldadas. No entanto, apresentam elevada capacidade de impregnação das fibras, conferindo propriedades adesivas adequadas e permitindo boas velocidades de processamento, uma vez que exibem reduzida viscosidade. Assim, para a indústria da construção, as resinas termoendurecíveis têm um maior potencial de aplicação [3].

A composição da matriz que constitui os materiais compósitos utilizados para desenvolvimento de elementos estruturais pode variar bastante, sendo que entre os polímeros termoendurecíveis, os mais comuns são o poliéster insaturado (UP), o viniléster (VE) e o epoxídico, uma vez que são facilmente processáveis e quimicamente resistentes [11]. A presente dissertação não irá abordar matrizes constituídas por resinas epoxídicas, por não terem sido utilizadas na campanha experimental.

De um modo geral, as resinas de poliéster insaturado são as que apresentam um melhor equilíbrio entre as propriedades que as caracterizam, sejam elas físicas, químicas ou a facilidade de processamento, com um custo relativamente reduzido, sendo por isso utilizadas em cerca de 75% de todas as aplicações em produtos FRP [3,6]. Uma característica negativa destas resinas é a sua elevada retração (cerca de 5 a 12%) [6]. É de referir que as cadeias poliméricas lineares das resinas de poliéster insaturado possuem ligações duplas entre carbonos (C=C), as quais permitem a formação de novas ligações covalentes na presença de radicais livres, permitindo assim a reticulação do polímero [5].

Quanto às resinas de viniléster, estas têm um custo ligeiramente superior às de poliéster insaturado, por apresentarem, por comparação com as segundas, melhor desempenho mecânico e durabilidade [3]. As suas propriedades mecânicas combinadas com uma boa dureza, resistência a ambientes ácidos e alcalinos, reduzida viscosidade e curtos períodos de cura (similares aos das resinas de poliéster insaturado) tornam as resinas de viniléster particularmente interessantes para aplicações na engenharia civil, principalmente para ambientes mais agressivos. No entanto, apresentam retrações semelhantes às das resinas de poliéster, entre 5% a 10% [6]. De facto, as resinas de viniléster são um híbrido entre as resinas epoxídicas e as de poliéster, combinando as melhores propriedades de cada uma [5].

A Tabela 2 apresenta uma síntese de algumas das propriedades mais importantes dos dois tipos de resina em estudo.

Tabela 2 – Propriedades gerais de resinas UP e VE, adaptado de [10].

Tipo de resina	Resistência à tração (MPa)	Módulo de tração (GPa)	Máx. deformação à tração (%)	Massa volúmica (g/cm ³)	T _g (°C)
Poliéster insaturado (UP)	20-70	2,0-3,5	1,0-5,0	1,20-1,30	70-120
Viniléster (VE)	68-82	3,5-4,0	3,0-6,0	1,12-1,16	102-150

2.2.3.3. Interface fibra-matriz

A interface que se forma entre a matriz e o reforço fibroso e que os mantém unidos - interface fibra-matriz [2] - tem influência no desempenho de um FRP. A qualidade desta ligação, tal como os materiais, a composição e arranjo do reforço fibroso, tem um papel fundamental no desempenho dos FRP. A compatibilidade mecânica e a adesão entre as fibras e a matriz, as quais podem ser melhoradas utilizando *sizings* adequados, bem como o ângulo definido entre o reforço fibroso e a direção do carregamento são as principais variáveis das quais esta interação depende, podendo resultar numa ligação mais fraca ou mais forte [3].

2.2.4. Estados físicos associados a um aumento de temperatura

As ligações moleculares que caracterizam os polímeros podem ser do tipo intra e/ou intermoleculares. A diferença entre ambas é que as primeiras consistem em ligações covalentes fortes e primárias; enquanto as segundas correspondem a ligações secundárias mais fracas (ligações de hidrogénio). As cadeias dos polímeros estão ligadas entre si por estas ligações secundárias que têm reduzida energia de dissociação. Assim, durante o processo de aquecimento da temperatura ambiente até à iniciação da decomposição térmica, as ligações primárias permanecem intactas. No entanto, as ligações secundárias são progressivamente quebradas, permitindo movimentos moleculares de relaxação. Desta maneira, o comportamento dos polímeros em estudo quando submetidos a um aumento da temperatura pode geralmente ser dividido em três fases distintas [12].

Numa primeira fase, comumente referida como estado vítreo, as propriedades mecânicas permanecem praticamente constantes com o aumento de temperatura e a maioria das ligações secundárias alongam sem partir. Na segunda fase, também referida como transição vítreo, ocorre uma redução substancial das propriedades mecânicas, para um certo intervalo de temperaturas, característico de cada polímero e para o qual é possível definir uma temperatura de transição vítreo (T_g) de referência. A T_g é a temperatura (de referência) para a qual o polímero passa de um estado endurecido e rígido para um estado macio e amolecido. Assim, alcançando e ultrapassando esta temperatura, as cadeias poliméricas apresentam maior mobilidade devido à quebra das ligações secundárias, levando a um amolecimento gradual do material. A fase referida termina com um patamar em que as propriedades permanecem constantes com a temperatura, que é característico do estado borrachoso. A fase de decomposição (estado decomposto), em que ocorre a decomposição da resina polimérica, é a última das três fases e representa a resposta do polímero à continuação de um aumento da temperatura para valores superiores à sua temperatura de decomposição (T_d) [12]. A Figura 1 ilustra, de forma qualitativa, a variação das propriedades de um polímero com a temperatura.

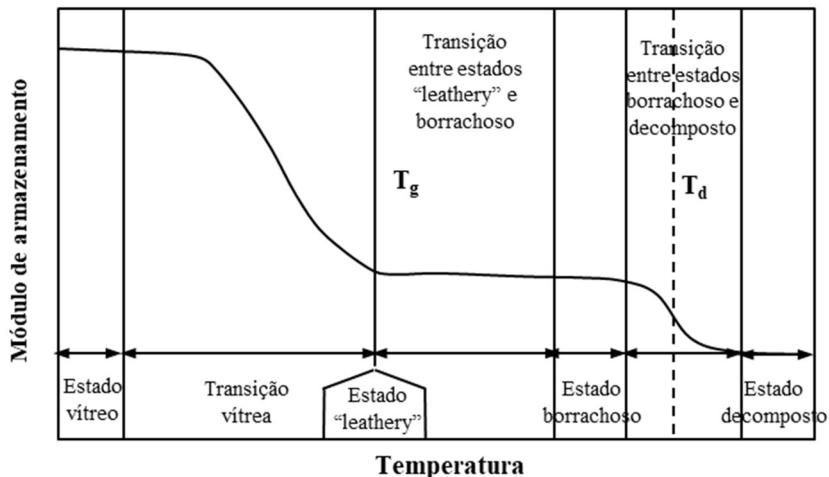


Figura 1 – Diferentes estados físicos do polímero em função do aumento de temperatura, adaptado de [13].

2.2.5. Processos de fabrico

Existem diversos processos de fabrico para materiais compósitos FRP utilizados em aplicações estruturais da engenharia civil, podendo estes serem agrupados em três categorias: manuais, semi-automatizados e automatizados. O método de produção a adotar terá por base as necessidades da aplicação, como o tipo de desempenho, a aparência e o tamanho que se deseja conferir ao FRP em questão. Outro fator que também pesa bastante na escolha do processo é a “quantidade necessária” vs. a “velocidade de produção e material disponível” [2]. Na presente dissertação, foram estudados materiais produzidos com um processo semi-automatizado, denominado “Moldagem por Transferência de Resina Assistida por Vácuo” (VARTM) ou, simplesmente, “Infusão a Vácuo”. Assim, apenas este método de produção será desenvolvido no presente capítulo.

O princípio básico da infusão a vácuo consiste em impregnar um material resinoso num reforço fibroso seco que se encontra colocado entre um filme plástico (saco de vácuo) e um molde rígido com o formato da peça que se pretende produzir. A infusão da resina ao longo do molde ocorre unicamente devido à pressão criada devido a condições de vácuo, garantindo a saturação eficaz da fibra e a compactação do compósito [2]. Desta maneira, o processo de VARTM utiliza a pressão atmosférica para garantir a consolidação e impregnação do material resinoso no reforço. Ao longo do filme plástico, são colocados “canais de entrada” para a resina e “canais de saída” de ar que permitem a formação de vácuo no interior do molde. Uma bomba de vácuo acoplada ao conjunto originará um gradiente de pressão de aproximadamente 1 atm entre o interior do saco de vácuo e o recipiente onde se encontra a resina, garantindo a sucção da mesma para o interior do saco de vácuo e a consequente impregnação dos laminados [14].

Em suma, a infusão a vácuo é um processo que não necessita de temperatura elevada ou pressão (para além da pressão atmosférica) para a criação do material compósito, sendo, por isso, um processo que opera com relativo baixo custo de equipamentos e de energia [15]. O método de VARTM apresenta também reduzida emissão de químicos voláteis orgânicos, flexibilidade de processamento, elevado

potencial para fabricar peças de grande área e espessura com conteúdo elevado em fibra e reduzido conteúdo de vazios. Desta maneira, este processo apresenta características que o tornam interessante de um ponto de vista económico para a produção de peças de grande escala e complexidade [16].

Quanto à disposição e organização das camadas de reforço, geralmente, esta apresenta-se como simétrica, por tal permitir um melhor comportamento mecânico dos laminados. Isto significa que, por cada camada de reforço aplicada a uma dada distância da camada central, existirá uma outra à mesma distância e com igual orientação [14]. É importante referir que, na infusão a vácuo, as camadas aplicadas durante a produção dos laminados não serão apenas do tipo reforço fibroso, com funções estruturais, isto é, existirão também (i) camadas de tecido com a função de melhorar a impregnação das fibras com a resina, denominadas *breather*, e (ii) camadas com a função de promover a transferência (percolação) da resina ao longo das camadas de reforço, denominadas *infusion mesh* [17].

2.2.6. Aplicações na construção

Nos últimos anos, o interesse por materiais compósitos para aplicações da construção tem vindo a aumentar bastante. Este aumento da aplicação de FRP na construção é facilmente justificado com as vantagens decorrentes da utilização deste material, já referidas: leveza, resistência, possibilidade de produzir qualquer formato, resistência à corrosão e fadiga, e fácil manutenção. Para além destes aspetos, outra vantagem associada à utilização dos materiais compósitos é o facto de, durante o seu processamento industrial, se obterem produtos e componentes num estado semifinalizado (“pré-fabricado”), os quais, de forma simples e rápida, são montáveis no local destinado, com um período diminuto de interrupção das atividades aí decorrentes (p. ex. tráfego no local de implantação de uma ponte) [18].

De um modo geral, existem quatro grandes grupos de aplicação de materiais compósitos em aplicações da engenharia civil: (i) reforço interno de betão armado (varões); (ii) reparação e reforço de estruturas existentes; (iii) estruturas novas híbridas, que combinam elementos estruturais em compósitos com outros em materiais convencionais; e (iv) estruturas totalmente constituídas por compósitos FRP. No caso das pontes, a maioria dos compósitos FRP são utilizados em componentes que funcionam à tração (por exemplo, os varões ou laminados de reforço) ou à flexão (por exemplo, os tabuleiros de pontes) [18].

Particularizando alguns exemplos para cada um dos grupos de aplicação, e começando pelo reforço interno do betão, verifica-se que a escolha de FRP é ideal para aplicação em pontes localizadas em ambientes agressivos, uma vez que, sendo um material que apresenta elevada resistência à corrosão, por um preço bastante competitivo, confere o reforço e durabilidade necessários para a realização da infraestrutura. A utilização de armaduras metálicas, nomeadamente em aço, pode apresentar deterioração precoce durante a vida útil, sobretudo em ambientes mais agressivos. Na Figura 2, ilustra-se a aplicação de varões de FRP como reforço interno para o tabuleiro de uma ponte localizada no Canadá [3].



Figura 2 – Preparação de tabuleiro de ponte em betão reforçado com varões de GFRP, no Canadá, adaptado de [3].

Quanto às aplicações deste material para reparação e reforço de estruturas pré-existentes, esta é uma técnica que já se encontra bem estabelecida e que é bastante utilizada, principalmente para reforço de tabuleiros e pilares de pontes. O material pode ser apresentado na forma de laminados, mantas, barras e/ou cabos de pré-esforço, com o intuito de aumentar a capacidade de carga da estrutura existente. No caso do reforço de pilares, o tipo de intervenção é essencialmente pelo exterior, por colagem de elementos em FRP (tipicamente, laminados ou mantas), como se ilustra na Figura 3(a). Outra possibilidade de intervenção está diretamente relacionada com o tabuleiro que, se degradado, poderá ser removido e substituído por outro totalmente constituído por perfis de FRP, como se apresenta na Figura 3(b) [3,6].



Figura 3 – Aplicações de FRP como reparação ou reforço: (a) mantas de CFRP utilizadas para reforço do Viaduto Duarte Pacheco; (b) instalação de tabuleiro totalmente em FRP, adaptado de [3].

Relativamente à aplicação em estruturas híbridas, estas, por serem maioritariamente concebidas tendo em conta o uso dos materiais convencionais, tipicamente tiram menos partido das potencialidades dos FRP. Este tipo de aplicação combina ou substitui o uso de elementos estruturais em materiais tradicionais por componentes ou elementos em FRP, tais como cabos exteriores, vigas e lajes (por exemplo, em tabuleiros de pontes, como ilustra a Figura 4) [3,18]. No entanto, a ideia de desenvolver estruturas híbridas pode também ser benéfica para o desenvolvimento e criação de estruturas mais resistentes, leves e duráveis parcialmente constituídas por FRP. Estruturas deste tipo tiram melhor

proveito de cada uma das propriedades do material escolhido e aplicado em cada componente da ponte. Desta maneira, não só podem ser adotados materiais convencionais para pilares e fundações, por apresentarem melhor custo-benefício para estas zonas, como também a própria escolha de materiais compósitos pode ser híbrida. Tome-se por exemplo, o estudo desenvolvido por *Hai et al.* [19], em que se adotaram FRP com diferentes tipos de fibras de reforço, em carbono e em vidro, para a execução de vigas em I com propriedades e custo otimizados [19].



Figura 4 – Ponte pedonal híbrida em aço/GFRP em Viseu, Portugal, adaptado de [3].

As estruturas totalmente concretizadas com FRP são construídas utilizando exclusivamente este material. No caso das pontes, a infraestrutura (fundações e pilares) poderá ser, à mesma, construída com recurso a materiais tradicionais, no entanto, a superestrutura é totalmente em FRP. Alguns dos exemplos mais emblemáticos são a Ponte de Pontresina, na Suíça (1997), ou a Ponte de Kolding, na Dinamarca (1997), ilustradas na Figura 5(a) e na Figura 5(b), respetivamente. As superestruturas de ambas as pontes são totalmente constituídas por perfis de GFRP e nenhuma demorou mais de um dia a ser montada. Para além do mais, tendo em conta que a ponte de Kolding se situa por cima de uma linha de comboio, a escolha de um reforço em FRP com fibra vidro garante a não existência de interferência com a eletrificação da linha. Esta é mais uma das muitas vantagens já enunciadas da utilização de FRP, neste caso reforçado com vidro [3].

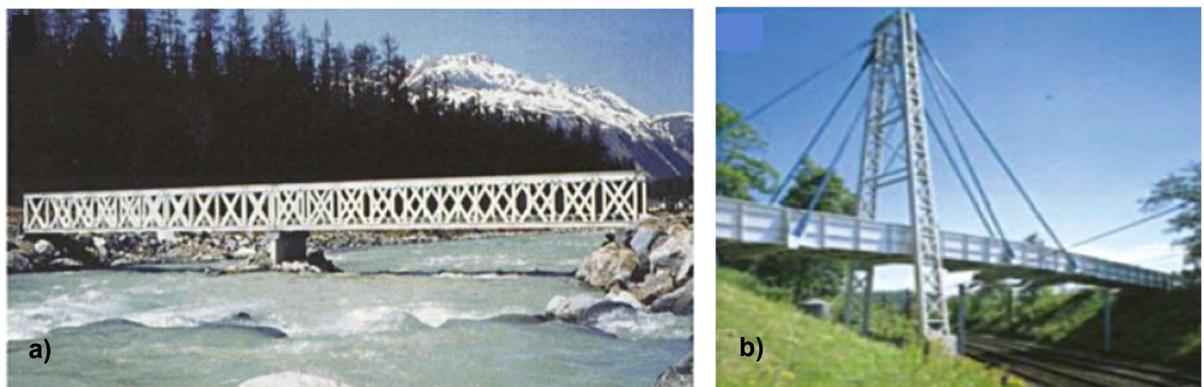


Figura 5 – Estruturas totalmente FRP: (a) Ponte de Pontresina, na Suíça; (b) Ponte de Kolding, na Dinamarca, adaptado de [3].

Em suma, o potencial dos materiais compósitos FRP na construção civil é muito elevado, quer seja para reabilitação ou construção de raiz. Muitos são os campos de aplicação, uma vez que são materiais que garantem elevada resistência mecânica, durabilidade mesmo em ambientes mais exigentes, reduzido peso próprio, e isolamento térmico e eletromagnético. Para a construção de pontes, este é um material com um potencial particularmente elevado, uma vez que, apesar de ter um custo de construção inicial superior (materiais tipicamente mais dispendiosos face aos materiais convencionais – nalguns casos, cerca de 10%, segundo [20]), apresenta um custo total de ciclo de vida potencialmente inferior. Os fatores que contribuem para esta redução são, por exemplo, o menor tempo de instalação, os custos de mão de obra inferiores e, sobretudo, a maior durabilidade e reduzida necessidade de manutenção ao longo da vida útil [3].

Apesar do referido e dos compósitos FRP serem atualmente encontrados em diversos formatos, aplicações e estruturas, a sua aplicação de maneira generalizada é, ainda, escassa. Esta situação é explicada pelo facto de existir uma quantidade reduzida de informação válida sobre o desempenho destes materiais para horizontes de serviço elevados. Por consequência, quando utilizados em infraestruturas, são aplicados fatores de redução que podem ser mais ou menos conservativos. Em ambos os cenários, os efeitos da degradação nas características do FRP poderão não ser considerados de maneira correta, podendo levar a custos excessivos ou a consequências gravosas [21]. De facto, na literatura disponível, existe uma elevada quantidade de dados sobre a durabilidade de materiais FRP; no entanto, são referentes a diferentes indústrias, como a aeroespacial, a automóvel, ou a marítima. Desta maneira, existe uma quantidade diminuta de dados corretos e bem validados sobre a durabilidade dos FRP quando sujeitos a ambientes e condições típicas da engenharia civil. Este facto pode ser explicado pelos FRP usados na engenharia civil serem particularmente diferentes dos usados nas outras áreas, quer em termos dos seus constituintes, quer do seu processo de fabrico. Assim, o estudo da durabilidade deste material quando sujeito aos vários ambientes associados à sua aplicação na engenharia civil é urgente e de extrema importância e será o principal objeto de estudo da presente dissertação [22].

2.3. Durabilidade

Como discutido na secção anterior, os materiais compósitos de polímeros reforçados com fibra de vidro são uma alternativa interessante para aplicação na engenharia civil, entre outras razões, por apresentarem elevada durabilidade. No entanto, e tal como a maioria dos materiais, quando expostos a diferentes tipos de ambientes, sofrem degradação física e química [7,8].

Assim, os estudos de durabilidade efetuados no contexto da engenharia civil para aplicações estruturais pretendem analisar as alterações nas propriedades do material GFRP em função do tempo. Estes estudos têm o objetivo de caracterizar os fenómenos de degradação que ocorrem, sendo que os agentes provenientes de cada ambiente poderão atuar individualmente ou em simultâneo, sendo esta última situação a mais comum [7,8].

Deste modo, nesta secção, apresenta-se uma breve revisão dos efeitos de alguns agentes ambientais nos GFRP e a forma como estes alteram o seu desempenho mecânico, tendo sido dado especial ênfase

à degradação higrotérmica, térmica e por exposição a radiação ultravioleta (UV). Outros fatores poderiam ser desenvolvidos, por exemplo os meios com carácter ácido ou alcalino, pois também interferem com a degradação dos GFRP. No entanto, por não corresponderem a nenhum dos ambientes de envelhecimento do projeto em questão (desenvolvido em detalhe no capítulo seguinte), os seus efeitos não serão abordados na presente dissertação. Ao leitor interessado recomenda-se a consulta das referências [7,23,24].

2.3.1. Suscetibilidade aos efeitos da humidade

Como referido, os GFRP são bastante utilizados em diferentes aplicações em que estão sujeitos a humidade e/ou a soluções aquosas. Tome-se por exemplo as componentes de uma ponte, particularmente o tabuleiro. Durante um período de chuva intensa, este será exposto a uma elevada concentração de humidade. Assim, é importante estudar o efeito causado no GFRP devido a tal exposição, pois a humidade migra e difunde-se, com diferentes taxas e alcances, para o interior de todos os polímeros orgânicos (como é o caso das resinas), podendo provocar alterações nas suas características a nível termofísico, mecânico e químico [8].

Desta maneira, a matriz polimérica será usualmente o componente com maior sensibilidade à humidade e as propriedades conferidas por esta serão as mais afetadas. Logo, será de esperar que, para um reforço unidirecional sujeito à absorção de água, a resistência e rigidez na direção das fibras (0°) serão menos afetadas do que outras propriedades. Por outro lado, na direção transversal, as propriedades poderão alterar-se mais significativamente, tal como a rigidez e a resistência ao corte [25].

A um nível microscópico, o primeiro efeito da absorção de humidade dá-se ao nível da matriz, na própria resina, podendo ocorrer alterações na estrutura do polímero, reversíveis ou não. Seguidamente, a humidade irá propagar-se ao longo da interface fibra-matriz, causando a sua deterioração, resultando em menos integridade a esse nível. Por fim, a degradação poderá mesmo afetar o reforço fibroso, pois a humidade, ao contactar com esta zona, remove os iões metálicos alcalinos (Na^+) das fibras, que migram para a superfície do vidro, alterando a sua estrutura. Esses iões, agora livres, vão-se combinar com a água, formando uma solução alcalina, que pode inclusivamente atacar a superfície da própria fibra (*pitting*). Deste modo, podem ocorrer danos no reforço fibroso que poderão reduzir a sua resistência, levando a uma rotura prematura [8,26].

No entanto, até certo ponto, é possível proteger as fibras com o intuito de retardar a propagação da humidade, desde logo através de uma escolha apropriada do sistema de resina e das condições de processamento. Para além disso, é possível aplicar um sistema de proteção superficial, seja por pintura, seja através de camadas de gel polimérico (*gel coats*). Outra maneira de retardar a degradação é curando totalmente a resina antes de ser colocada em serviço num determinado ambiente, garantindo a não existência de microfendilhação ou outra forma de deterioração física [8].

É importante referir que, para esta dissertação, o estudo da degradação do material aquando da presença de água será feito em conjunto com o aumento de temperatura. Este aumento de temperatura contribuirá essencialmente para acelerar o processo de envelhecimento devido à exposição à humidade [21].

2.3.1.1. Ingresso de água no compósito

Após a introdução de um material compósito num meio aquoso, a penetração da humidade dá-se por difusão ou por capilaridade. O mecanismo de penetração de humidade inicia-se com a dissolução das moléculas de água na superfície do polímero, ocorrendo simultaneamente a sua difusão através do volume, formando-se uma solução com o polímero [8].

A entrada das moléculas de água no compósito pode acontecer por adsorção ou por absorção. O primeiro mecanismo corresponde apenas a um aumento de humidade capilar, que ocorre através de poros existentes e defeitos na estrutura do polímero. Desta forma, não origina plasticização da matriz, causando a dilatação do material. Esta água não reage com o polímero, pelo que, quando há condições para tal (por exemplo, por secagem), é facilmente removida. Quanto ao segundo processo enunciado, este forma uma nova solução, resultante de interações físicas entre as moléculas de água polares e os grupos polares do polímero. Assim, as moléculas de água que sofrem o referido processo reagem com o material polimérico, sendo mais dificilmente removidas, geram calor e dilatação, e promovem a plasticização [27,28].

Os compósitos reforçados com fibras de vidro geralmente seguem um comportamento de difusão Fickiano, o que significa que a taxa de difusão da humidade é inicialmente constante, diminuindo a partir de determinada altura, sendo que a absorção de humidade tende para um patamar de saturação [8], como se ilustra na Figura 6.

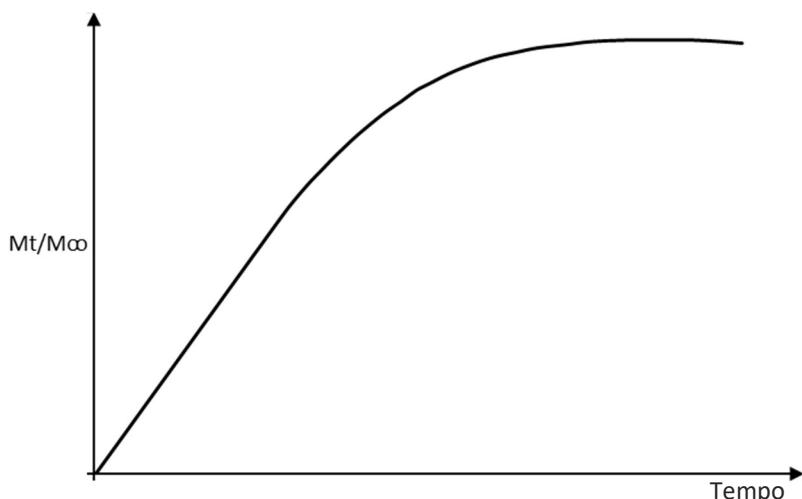


Figura 6 – Evolução da absorção de água para o interior do GFRP em função do tempo, adaptado de [8].

2.3.1.2. Influência da humidade em cada constituinte

A presença de humidade num compósito FRP poderá alterar as suas propriedades. No entanto, as alterações não serão sempre do mesmo tipo, podendo distinguir-se dois tipos diferentes de degradação com consequências distintas para as propriedades do compósito.

Existe, assim, uma degradação física, usualmente denominada por plasticização, em que as alterações das propriedades do material são reversíveis e recuperáveis quando o material seca. E existe uma degradação química, normalmente associada a maiores tempos de exposição, em que ocorre degradação irreversível a nível molecular dos diferentes componentes do GFRP, incluindo a interface fibra-matriz [8].

Como consequência última da degradação dos GFRP, quer seja ela física e/ou química, poder-se-á identificar um decaimento generalizado nas propriedades mecânicas do material [8].

De maneira geral, a degradação proveniente do efeito da água salgada será semelhante (ou até ligeiramente inferior) à causada pela exposição a água destilada (sem saturação de sais minerais). O que diferencia estes dois meios será a concentração final de água presente no interior do material compósito quando imerso nas mesmas condições de tempo e temperatura. De facto, a concentração de água proveniente da imersão em água salgada será inferior, quando comparada com água destilada, uma vez que a presença de sais torna a absorção menos rápida [8]. Alguns estudos anteriores (p. ex. [29]) provaram que o principal componente absorvido pelo FRP quando imerso numa solução salgada é, de facto, a água [29].

Resina

A degradação da resina ocorre, primeiramente e para intervalos de tempo menores, através da penetração de água no polímero, causando uma degradação física, que se pode manifestar através de um aumento de volume, relaxação e/ou plasticização do polímero [26]. A plasticização é um mecanismo de degradação que resulta num aumento da mobilidade molecular, com origem na presença de pequenas moléculas de água nos interstícios das grandes cadeias do polímero. Desta forma, a distância intermolecular aumenta e as forças de coesão diminuem [8]. Este processo é reversível e resulta na diminuição da T_g , proporcionada pela elevada mobilidade molecular, como referiram Ghorbel e Valentin [30].

Para situações nas quais ocorra uma exposição mais prolongada à humidade, ocorrerá também, em simultâneo com os fenómenos anteriormente descritos, um processo químico denominado por hidrólise. Este processo promove a cisão da cadeia molecular do polímero e afeta a ligação da interface, uma vez que os *sizings* (revestimentos poliméricos aplicados às fibras) também sofrem hidrólise, contribuindo para uma diminuição da aderência fibra-matriz [26]. A hidrólise afeta irreversivelmente a estrutura química da matriz e causa igualmente uma diminuição da T_g [30].

A sensibilidade à humidade das resinas e a forma como aquela penetra e alcança diferentes extensões de cada polímero dependem do tipo de polaridade da estrutura molecular, do grau de reticulação da mesma e da presença de monómeros que atraem a água [25]. É importante referir que uma reticulação incompleta da resina (comum na maioria dos casos em que não é garantida uma cura total da resina), bem como uma elevada concentração de ligações éster (presentes nas resinas de poliéster e viniléster), contribuem para reduzir a estabilidade a temperaturas mais elevadas e aumentar a degradação relacionada com a presença de humidade, favorecendo a hidrólise e subsequente lixiviação de elementos de baixo peso molecular [8].

Apesar do referido anteriormente, a imersão em água pode apresentar, também, consequências positivas para o desempenho dos compósitos FRP, já que o envelhecimento químico pode ocorrer sob a forma de pós-cura, que resulta num aumento da T_g e das propriedades mecânicas. Esta situação justifica-se pelo facto de a presença de água promover a ocorrência de reações de cura, entre os monómeros de estireno e anidridos com os radicais fixos na rede. Estas reações adicionais encontravam-se previamente inibidas por oxigénio e a sua ocorrência favorece assim, a taxa de reticulação da rede polimérica [8,31].

Portanto, de um modo geral, pode existir um aumento do grau de cura no período inicial de exposição à humidade (que promove um aumento das propriedades mecânicas), resultando assim numa competição com os mecanismos de degradação induzidos pela humidade. No entanto, para temperaturas de imersão mais elevadas, os efeitos de pós-cura são menos notórios, sendo dominados pelo rápido início da deterioração [21].

Vários estudos realizados ao longo dos últimos anos permitiram tirar conclusões relativamente aos efeitos da humidade nas duas resinas em estudo, poliéster insaturado e viniléster. Quanto à resina de viniléster, segundo Chin *et al.* [32], esta apresenta-se como mais estável quimicamente em ambientes aquosos e menos suscetível à hidrólise, absorvendo menos humidade quando imersa em água a 20°C [33]. De forma contraditória, Ghorbel e Valentin [30] sugeriram que o viniléster tem menor estabilidade química e térmica do que o poliéster insaturado, apresentando maior hidrólise e plasticização, e maior absorção de humidade. Os resultados contraditórios podem ser justificados devido à possibilidade de diferenças significativas na formulação química das diferentes matrizes, devido ao uso de aditivos, ou pelos processos de fabrico serem distintos, podendo alterar significativamente o comportamento dos materiais [33]. Apicella *et al.* [31] confirmaram que a presença de humidade no interior dos FRP não trazia apenas consequências negativas, favorecendo também a pós-cura e, dessa forma, promovendo a integridade mecânica da matriz.

Quanto ao estudo das propriedades mecânicas propriamente ditas, este é bastante complexo, uma vez que testes distintos poderão fornecer resultados diferentes. De um modo geral, a exposição de resinas poliméricas a condições higrotérmicas provoca uma redução na sua T_g , devido à plasticização que ocorre em todos os polímeros. Desta maneira, as propriedades mais dependentes da matriz irão sofrer alterações, verificando-se, por exemplo, reduções das resistências ao corte e à compressão [25]. No entanto, outros estudos realizados (Apicella *et al.* [34]) permitiram concluir que o envelhecimento em condições aquosas, especialmente quando associado a temperaturas elevadas, pode também promover o aumento da T_g e do módulo de elasticidade, bem como um aumento da fragilidade, consequência do efeito de uma cura residual [8]. Quanto às propriedades dominadas pela fibra, estas serão pouco afetadas – por exemplo, a resistência à tração na direção das fibras e o módulo de elasticidade nessa direção. As propriedades dos GFRP dependentes do tempo, como a fluência, são determinadas pela viscoelasticidade da matriz, que, por sua vez, é influenciada pela presença de humidade [25].

Reforço fibroso em vidro

A componente do reforço fibroso, apesar de genericamente mais durável do que a matriz, também apresenta suscetibilidade à humidade, uma vez que sofre degradação na sua presença, por vezes designada por corrosão (embora corresponda a um fenómeno muito distinto do que se verifica nos metais). Esta degradação pode ser explicada por dois mecanismos distintos: um primeiro, provocado pela humidade adsorvida, que causa uma redução da energia de superfície da fibra de vidro, reduzindo a coesão do material; um segundo, que envolve a perda de resistência da fibra de vidro em ambientes húmidos, devido ao lento crescimento de fendas que, ao atingirem um tamanho crítico, levam à sua rotura [35].

O primeiro mecanismo de corrosão para o vidro foi proposto por Charles [36], que mostrou que a corrosão do vidro era dependente da temperatura. Schmitz e Metcalfe [35] desenvolveram outra teoria, mostrando como é que falhas pré-existentes no material servem de local para iniciar a hidrólise e as reações de troca de iões, consequentemente levando à rotura da fibra.

De um modo geral, antes da fratura, ocorre um período de incubação, em que a água reage com os catiões da fibra de vidro, promovendo a hidrólise e aumentando a concentração de iões hidróxidos. Esta fase mantém-se até ser atingida a concentração necessária que promove a corrosão. Iniciada a corrosão, esta irá desenvolver-se até que falhas de tamanho crítico sejam formadas, ocorrendo a fratura [35].

É importante referir que a presença de fibras, componente característica dos materiais compósitos, promove maior absorção de humidade, uma vez que a existência deste constituinte, em conjunto com a interface criada entre o reforço fibroso e a matriz, permitem o aparecimento de caminhos adicionais para a difusão de água por capilaridade [30,31].

Bascom [37] realizou uma alargada revisão sobre a adsorção de água em fibras de vidro e a consequente degradação promotora do surgimento de fendas. A rotura começaria com falhas superficiais na superfície do vidro, que se propagariam aquando da aplicação de tensão. No entanto, o estado de desenvolvimento da fenda que leva a uma rotura permanente é dependente das dimensões e forma do provete e da maneira como a carga é aplicada. Diferentes mecanismos poderão ser considerados para a diminuição da resistência do reforço fibroso, sendo estes: (1) redução da energia de superfície da fibra de vidro à medida que a fenda se propaga; (2) fragilização do material pela água na fenda; (3) corrosão superficial das fibras de vidro; (4) condensação de água na extremidade da fenda que, exercendo pressão capilar, promove a abertura das fendas [8].

Interface

Como referido, a interface criada pela coexistência no mesmo material de um reforço fibroso e de uma matriz polimérica é igualmente preponderante para o correto funcionamento dos materiais FRP. Desta maneira, é importante estudar o efeito da humidade nesta zona.

O efeito da humidade na interface fibra-matriz pode atuar, essencialmente, de duas formas. Primeiro, a humidade pode reduzir quimicamente a força de ligação entre a fibra e a matriz, degradando os *sizings* e agentes de aglutinação ao longo da interface. O segundo efeito resulta da introdução de água

na matriz, o que é geralmente acompanhada de uma dilatação, afetando também, negativamente, a interface. Para além do referido, durante a cura da resina, em que é verificada uma retração generalizada, e durante o arrefecimento do compósito após cura, são geradas tensões residuais. Estas tensões originam esforços de tração paralelos à fibra e de compressão na interface. Assim, a dilatação originada pela absorção de água para o interior da resina irá reduzir estas tensões residuais, induzindo uma relaxação das tensões de compressão ao nível a interface que, consequentemente, reduzem a resistência da interface do compósito ao corte [8].

2.3.2. Suscetibilidade a efeitos térmicos

Ao serem escolhidos materiais compósitos para aplicações exteriores, há que ter em conta um dos principais agentes ambientais que estará presente na sua vida útil de serviço, a temperatura. Na presença de temperaturas distintas, este material apresentará diferentes respostas. Assim, serão consideradas temperaturas com influência aquelas que: (i) ultrapassem a temperatura de cura, (ii) apresentem variações ao longo do tempo (p. ex. cíclicas), e (iii) criem condições de congelamento e gelo-degelo [7]. No desenrolar deste subcapítulo, será dado ênfase às referidas temperaturas com efeito na degradação dos FRP. As temperaturas atingidas durante um incêndio encontram-se fora do âmbito da presente dissertação e, por isso, não serão referenciadas ao longo do texto.

Temperatura de cura

Para melhor entender o efeito da temperatura nas propriedades do material, há que entender primeiro a forma como a temperatura de cura afeta este material. De forma genérica, a matriz polimérica, na presença de um iniciador, catalisador, calor e pressão, solidifica através de um processo químico exotérmico, denominado cura. Antes de curado, o polímero apresenta-se como um fluido viscoso. Resultado da cura, o polímero adquire características sólidas e vítreas, diminuindo o volume da resina [38].

Como referido, a temperatura influencia as propriedades mecânicas dos materiais compósitos, pois interfere com o processo de cura e a velocidade a que este decorre. É a relação entre a temperatura de cura e a temperatura de transição vítreia (sendo esta também dependente da anterior) que define o estado físico do material. Desta maneira, uma temperatura de cura mais elevada, comparativamente com uma mais reduzida, irá proporcionar um processo de cura mais acelerado, um maior grau de reticulação e uma T_g de valor superior. Assim, pode-se concluir que a temperatura e o tempo de cura têm um papel preponderante para o correto funcionamento dos FRP [39].

Em suma, o grau de cura aumenta, até certo ponto, com o tempo e temperatura, uma vez que, à medida que é fornecida mais energia térmica ao sistema, mais acelerada é a reação da cura, proporcionando um aumento da mobilidade das cadeias, o que permite maior conversão das insaturações da cadeira linear em pontos de reticulação. Assim, é fulcral encontrar a temperatura ótima que permite uma cura completa, mas sem promover a degradação do material [12].

Temperatura elevada

Em termos gerais, o efeito da temperatura elevada poderá causar dois cenários distintos para o FRP. Por um lado, na presença de temperatura elevada, o polímero presente no FRP poderá experientiar

fenómenos de pós-cura, promovendo reticulação adicional (fenómeno semelhante ao descrito acima); por outro lado, se a exposição a temperaturas elevadas se mantiver de forma continuada, dependendo da sua magnitude, o impacto poderá ser negativo, uma vez que contribuirá para o amolecimento da resina, reduzindo o seu desempenho mecânico durante o período de exposição. Estes efeitos serão ainda mais notórios para uma exposição a temperaturas superiores à T_g . Diferentes estudos concretizados a temperaturas elevadas permitiram verificar o referido e concluir que os compósitos FRP nunca deverão ser utilizados em temperaturas acima da T_g [4].

Feng *et al.* [40] foi um dos estudos que permitiu defender a conclusão enunciada. Neste estudo, os autores submeteram um conjunto de provetes a um aumento de temperatura até 120 °C (mantendo-se na temperatura máxima por 15 minutos) e seguidamente testaram os provetes à flexão e compressão, para as seguintes temperaturas de testagem: 25 °C, 45 °C, 60 °C, 90 °C e 120 °C. Com a concretização dos referidos testes, os autores concluíram que com a aproximação da temperatura de exposição à T_g , a resistência à flexão e à compressão são de apenas 18% e 33% dos seus valores iniciais, respetivamente. Estes resultados mostram a elevada degradação das propriedades mecânicas com a temperatura elevada e que para uma mesma degradação, as propriedades mecânicas apresentam degradações distintas.

Temperatura reduzida

As temperaturas reduzidas também podem ter impacto no desempenho dos FRP. Isto porque os materiais constituintes, nomeadamente a matriz polimérica, sofrem alterações nas suas propriedades e, também, porque os seus coeficientes de expansão térmica apresentam diferenças significativas entre si [41]. Assim, dependendo da sua magnitude, as temperaturas negativas podem promover o endurecimento da matriz, a microfissuração e a degradação da interface fibra-matriz [42]. Dutta *et al.* [38] concluíram que as temperaturas negativas provocam o endurecimento do FRP e a melhoria do comportamento mecânico dominado pela matriz, sendo o mais notório o comportamento à flexão. Os valores do módulo de elasticidade (E) e do módulo de distorção (G) aumentam para estas temperaturas [38].

Sápi *et al.* [43] afirmaram ainda que, para além dos módulos referidos, a própria resistência à tração irá igualmente aumentar com a diminuição da temperatura. A razão é a diminuição da mobilidade da cadeia do polímero, a qual aumenta as forças de ligação entre as moléculas e, assim, a resistência do material. O coeficiente de Poisson (v) diminui com a diminuição da temperatura, devido ao aumento da rigidez da resina. De maneira genérica, pode-se afirmar que a diminuição da temperatura contribui para um aumento das resistências e dos módulos, da resistência à fadiga e das propriedades térmicas. No entanto, contribui negativamente para uma redução da ductilidade, tornando menor a deformação que leva à rotura, bem como a resistência à fratura e ao impacto [43].

Dutta *et al.* [41] postularam que, durante o processo de cura, em que ocorre arrefecimento da matriz polimérica, o material retrai, promovendo uma ligeira e parcial encurvadura (*micro-buckling*) das fibras presentes no FRP. Por consequência, ao testar estes materiais para temperaturas reduzidas, para as quais ocorre um endurecimento da matriz, as fibras podem apresentar este tipo de imperfeição geométrica, resultando numa distribuição não uniforme da carga pelas fibras. Assim, parte destas

fibras, quando sujeitas a um carregamento, irão suportar maiores tensões, resultando na sua rotura prematura e promovendo, posteriormente, a rotura das restantes [41].

Variações térmicas

Em termos gerais, as variações térmicas que ocorrem nos materiais compósitos originam tensões residuais, que são geradas devido às diferenças entre os coeficientes de expansão térmica dos elementos constituintes do material, as fibras e a matriz. Estas tensões podem originar a formação de microfissuras na matriz e na interface fibra-matriz.

Sob o efeito de ciclos térmicos, as microfissuras podem crescer até coalescerem e formarem fissuras que se propagam. As fibras de reforço dos FRP retardam e impedem parcialmente a propagação da fissuração. No entanto, sob exposição prolongada, estas fissuras continuarão o seu desenvolvimento, podendo mesmo levar à rotura. Assim, à medida que o número de ciclos aumenta, a severidade e densidade das fendas na matriz também aumenta, podendo, conjuntamente, interferir com as propriedades dominadas pelas fibras, tal como, a resistência à tração e à flexão [41].

Assim, de maneira a estudar o efeito da exposição a ciclos térmicos, compreendendo temperaturas elevadas e reduzidas, Sousa *et al.* [42] concretizaram um conjunto de ciclos de temperatura (190 ciclos de -5°C a 40°C em condições secas) em provetes de GFRP. Este estudo permitiu aos autores afirmar que o comportamento viscoelástico do material apresentaria apenas pequenas diferenças, indicando uma degradação sem significado quer ao nível da matriz, quer ao nível da interface. Do ponto de vista mecânico, as propriedades à flexão foram as que se apresentaram como mais afetadas. Para além disso, foram identificados dois mecanismos de propagação de fendas: (i) rotura coesiva (fissuração da matriz) onde a fenda se propaga dentro da matriz; e (ii) rotura adesiva (descolagem da interface fibra-matriz) onde a fenda se propaga na interface, como consequência dos diferentes coeficientes de expansão térmica da fibra e da matriz, com o consequente acumular de tensões internas [42].

Feng *et al.* [40], com o intuito de avaliar a retenção das propriedades mecânicas de um GFRP a ciclos de temperatura elevada, desenvolveram e concretizaram um procedimento experimental, onde os provetes foram artificialmente envelhecidos em ciclos de 24 horas, fazendo variar a temperatura entre 45 e 130°C, em ciclos de 15 minutos por um período até 60 dias. De seguida, testaram os provetes à temperatura ambiente; neste estudo, não ocorreu nenhuma alteração significativa nos mecanismos de rotura, sendo estes causados por rotura das fibras à tração a meio vão do provete. A resistência à flexão e o respetivo módulo não sofreram alterações significativas, tendo mesmo sido verificado um aumento na ordem de 20% no módulo à flexão, com origem provável em processos de pós-cura [40].

Quanto ao ciclos gelo-degelo, a sua existência pode resultar em delaminação, microfissuração ao nível da matriz e interface, e formação de vazios. Estas consequências são resultado dos seguintes dois efeitos: (i) menor densidade do gelo face à água, o que implica um aumento de volume da humidade contida no interior do material aquando da congelação; (ii) diferença entre os coeficientes de expansão térmica dos materiais constituintes do FRP. Estas alterações no compósito irão alterar a permeabilidade à humidade ou a gases tóxicos, afetando as suas propriedades físicas, como as resistências mecânicas e a impactos e a rigidez [41,42].

Wu *et al.* [44] avaliaram o efeito dos ciclos gelo-degelo através do estudo das propriedades mecânicas à flexão e da T_g para um painel multicelular em GFRP utilizado para tabuleiros de pontes. A temperatura utilizada para os ciclos térmicos variou entre -17,8°C e 4,4°C (625 ciclos – 1250 horas) e o material foi sujeito a estes ciclos térmicos em diferentes ambientes de exposição, como água destilada, água salgada e ar seco. Neste estudo, os autores não verificaram a existência de efeitos significativos no material, nem na resistência à flexão, nem no módulo de armazenamento, nem no fator de perda [44].

2.3.3. Suscetibilidade à radiação ultravioleta (UV)

Durante a vida útil dos materiais compósitos, principalmente quando aplicados no exterior, diversos fatores externos, para além da temperatura e da humidade, poderão interagir com o material, contribuindo para a sua degradação. Este subcapítulo trata um desses fatores externos, a radiação ultravioleta.

A radiação ultravioleta (UV) é um dos agentes mais relevantes de envelhecimento ambiental e é, também, um dos agentes de degradação com mais impacto nos compósitos FRP, uma vez que inicia reações fotoquímicas que provocam alterações irreversíveis no material, tais como a descoloração, a perda de brilho e alterações da resistência que, nalguns casos, podem ser significativas. A referida degradação ocorrerá principalmente ao nível da matriz polimérica, podendo, por consequência, afetar severamente as propriedades mecânicas do FRP [25,45].

Quando a radiação UV atinge o FRP, podem ocorrer diversas reações fotoquímicas ao nível da resina polimérica, causando alterações irreversíveis no material, nomeadamente as seguintes: formação de grupos funcionais na presença de oxigénio (carbonilo, carboxilo e peróxido); cisão; processos de reticulação; e/ou o rearranjo da cadeia do polímero. Como é notório, algumas destas alterações podem contribuir para melhorar o desempenho do FRP (aumento dos processos de reticulação e rearranjo da cadeia do polímero). Estes fenómenos irreversíveis são consequência de reações de pós-cura e contribuem para melhorar as propriedades do material. No entanto, se a exposição for prolongada para períodos de tempo superiores, haverá uma sobreposição do fenómeno de pós-cura, com o fenómeno de degradação da matriz (desenvolvido adiante). Como consequência desta sobreposição, as propriedades finais de um laminado exposto à radiação UV são o resultado da sobreposição destes dois fenómenos. [45].

A degradação dos polímeros presentes nos FRP baseia-se num fenómeno de foto-degradação, que tem origem aquando da absorção da componente UV da radiação solar. Os primeiros danos causados são observáveis apenas à nano-escala, na superfície do polímero, onde se torna visível o surgimento de protuberâncias e fissuras. Por consequência das alterações ao nível molecular, as propriedades mecânicas e óticas do polímero sofrem também modificações. Primeiramente, torna-se visível uma alteração da cor e brilho (efeito apenas estético), resultado da remoção da superfície do polímero de cadeias moleculares que se fragmentaram. Esta degradação, quando associada a exposições longas, progride, até influenciar as propriedades mecânicas na camada afetada de material, formando-se fissuras de relativa dimensão. A fissuração é essencialmente resultado da reação de cisão das cadeias, da qual os produtos que daí resultam ocupam maior volume do que o polímero no seu estado inicial, originando o desenvolvimento de tensões na sua superfície. Uma consequência indireta desta

degradação é a entrada mais facilitada de humidade para o interior do GFRP, promovendo a sua degradação mais acelerada. É ainda de referir que, apesar das modificações referidas, a temperatura de transição vítreia não é, geralmente, afetada, sendo a degradação resultante de exposição aos UV geralmente circunscrita à superfície exposta do material [45].

Se a exposição à radiação UV se mantiver, a degradação continuará a evoluir até ocorrer um processo denominado de *fiber blooming*, o que significa que, após erosão continuada dos fragmentos moleculares da resina (removidos da superfície do polímero por reações de cisão da cadeia molecular), a camada superficial das fibras será exposta aos elementos ambientais. Neste ponto, pode-se afirmar que o FRP se encontra sujeito a degradação severa, ficando comprometido de um ponto de vista estético e funcional, sendo também maior a sua capacidade de retenção de humidade. À medida que este fenómeno se propaga para o interior do FRP, algumas propriedades mecânicas serão mais afetadas, como é o caso da resistência à tração, mas também da resistência ao choque, consequência da degradação de ambas, matriz polimérica e interface fibra-matriz [45].

Ao nível da fibra, a degradação é menos evidente, mas, de acordo com Jones [25], a radiação UV pode contribuir para a corrosão das fibras de vidro por tensões e fendilhação de origem ambiental. Este fenómeno pode levar a uma rotura frágil e lenta das fibras de vidro, enfraquecendo o reforço fibroso durante o seu horizonte de serviço [25].

É ainda importante referir que a matriz não irá absorver a totalidade dos comprimentos de onda presentes no feixe de radiação. Assim, apenas a fração absorvida causará danos no compósito, independentemente da sua intensidade [45]. Com o propósito de evitar esse fenómeno, é importante a escolha de uma resina que promova a absorção da radiação ultravioleta nos comprimentos de onda mais prejudiciais (há aditivos específicos para este efeito), possivelmente combinada com o uso de revestimentos protetores [25].

2.3.4. Modelos de previsão da degradação e dimensionamento

Atualmente, as estruturas de engenharia civil são dimensionadas para vidas úteis de 50 anos ou mais (no caso das pontes, em muitos casos, 100 anos). Para esse efeito, são necessários códigos de dimensionamento (por exemplo, os Eurocódigos) que permitam prever o comportamento mecânico e a durabilidade dos materiais.

Este é precisamente um dos pontos mais críticos aquando da escolha de materiais compósitos FRP para uso nas infraestruturas de engenharia civil. Esta situação deve-se ao facto de existir uma escassez de dados e modelos de previsão relativos à sua durabilidade em serviço. Para além disso, os dados que existem representam períodos de envelhecimento curtos – na grande maioria dos casos, 2 a 3 anos, e os dados apresentam grande dispersão; apenas uma pequena minoria dos estudos tem durações entre 5 e 10 anos, ainda assim claramente inferior aos 50 (ou 100) anos de projeto. Como consequência, e tendo em conta (i) os diversos mecanismos de degradação que podem afetar os materiais compósitos, (ii) a diversidade de possibilidades de combinação de fibras de reforço, matrizes poliméricas e processo de fabrico, bem como (iii) as potenciais consequências de exposição aos agentes ambientais, não obstante o seu bom desempenho em ambientes agressivos, o uso de

compósitos tem sido preferido precisamente por causa da sua durabilidade. Desta maneira, o estudo da durabilidade destes materiais é muito importante.

Neste tipo de investigações, seria necessário aguardar até ao fim da sua vida de serviço (pelo menos 50 anos) para avaliar o verdadeiro decaimento das propriedades de um FRP. Assim, com recurso a modelos de previsão matemáticos, procura-se estimar a redução das suas propriedades mecânicas, fornecendo dados que permitem o dimensionamento de infraestruturas, tendo em conta as (previsíveis) alterações nas propriedades dos materiais e, se necessário, a adoção de medidas de mitigação [46].

Um dos principais modelos de degradação utilizados para a previsão das propriedades mecânicas dos FRP a longo prazo é o modelo analítico de Arrhenius; este modelo é utilizado para representar efeitos de primeira ordem nas propriedades mecânicas em função do tempo e da temperatura [46]. A teoria de Arrhenius tem vindo a ser usada quando é necessário o desenvolvimento de modelos de previsão para as propriedades mecânicas a longo prazo de materiais GFRP. No entanto, sendo um modelo de previsão, apresenta algumas limitações, pois considera que o material é afetado por um único mecanismo de degradação, o qual não se modifica com o tempo ou a temperatura, mas que pode acelerar com o aumento da segunda. Desta maneira, para cenários em que atuem múltiplos mecanismos de degradação (comuns na maioria das situações), o modelo não é em princípio aplicável [46]. Para além do referido, o modelo de Arrhenius é menos exato em situações em que se lide com alterações dependentes do tempo, relacionadas com danos progressivos na matriz, fibra e interface fibra-matriz. No entanto, este modelo é bastante utilizado para extrapolar dados a curto prazo para escalas temporais maiores, pois permite comparar dados, considerando uma vida de serviço representativa [46].

No estudo realizado por Garrido *et al.* [46] foram aplicadas as especificações do modelo proposto por Bank [47] aos dados experimentais recolhidos por Sousa [13]. Para tal, o método requer que seja feito um gráfico dos dados numa escala temporal logarítmica. Se os resultados apresentarem um ajuste correto na escala definida, a degradação deverá seguir o tipo de desenvolvimento de Arrhenius (a regressão linear é considerada aceitável quando o coeficiente de regressão $R^2 > 0,8$). Respeitando esta condição, é possível produzir gráficos que apresentem as propriedades de retenção ao longo do tempo em função do inverso da temperatura de exposição absoluta, tornando possível a previsão do comportamento a longo prazo para uma dada temperatura [46].

A aplicação deste modelo permite definir os valores de um fator de conversão orientado para o dimensionamento, que tem em conta os efeitos da exposição à humidade (η_{cm}), em elevadas concentrações e de forma continuada, nas propriedades mecânicas dos GFRP. Para além deste fator de conversão, é também possível definir um fator idêntico para a temperatura (η_{ct}). De acordo com a especificação técnica CEN/TS 19101: 2022 [48], a combinação destes fatores permite determinar um fator de conversão global (η_c), que terá em conta a temperatura e humidade, bem como a incerteza dos seus efeitos, o qual é definido através da Equação (1) [46]:

$$\eta_c = \eta_{ct} \times \eta_{cm} \quad (1)$$

Com base no valor de η_c , é possível determinar o valor de cálculo da resistência (R_d) para uma situação particular através da Equação (2) [37],

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{Rd}} R \left\{ \eta_{c,i} \frac{X_{k,i}}{\gamma_{m,i}}; a_d; \sum F_{Ed} \right\} \quad (2)$$

em que γ_{Rd} é um fator parcial associado à incerteza no modelo de resistência e aos desvios geométricos, se estes não forem modelados explicitamente; $R\{\dots\}$ é o valor associado ao modelo de resistência para um determinado modo de rotura; $\eta_{c,i}$ é o fator de conversão que traduz os efeitos da temperatura e humidade numa propriedade i ; $X_{k,i}$ é o valor característico da propriedade do material i ; $\gamma_{m,i}$ é um fator parcial que contabiliza a variabilidade de uma dada propriedade do material i em torno do seu valor característico; a_d é o valor de dimensionamento dos parâmetros geométricos, que são definidos pelos seus valores nominais (especificados); F_{Ed} corresponde ao valor de cálculo das ações consideradas [46].

Na Figura 7 é apresentado um gráfico com cerca de 515 pontos, representativos de mais de 1500 testes mecânicos realizados em diferentes compósitos de GFRP (diferindo quanto à sua resina, conteúdo em fibra, processos de produção, espessura do laminado) sujeitos a diferentes meios de imersão e considerando diferentes propriedades mecânicas. Este gráfico apresenta uma perspetiva geral dos dados obtidos em diversos estudos realizados anteriormente, uma vez que a cada ponto corresponde a média da retenção das propriedades mecânicas de um conjunto de provetas.

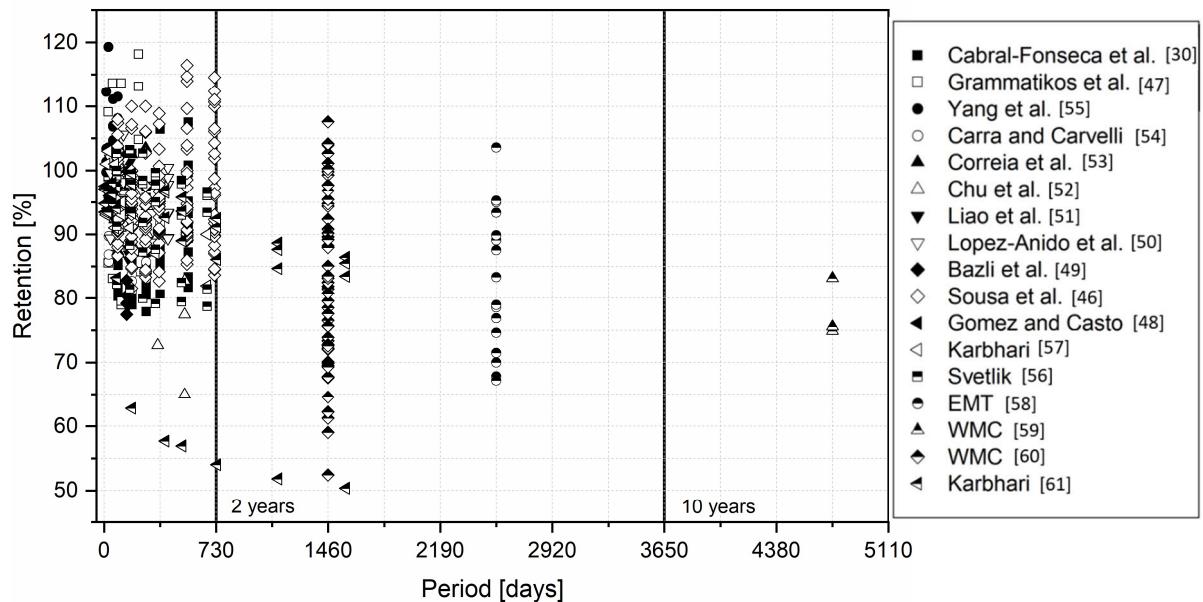


Figura 7 – Dados experimentais das propriedades de GFRP, adquiridos pela pesquisa de Garrido et al. [46].

O gráfico acima mostra, de forma notória, uma elevada dispersão dos valores das propriedades de retenção para iguais períodos de envelhecimento. Esta dispersão resulta da elevada diversidade associada à produção e constituição dos GFRP. No entanto, é evidente uma redução generalizada da retenção (%), associada às propriedades mecânicas em função do tempo de exposição. Por outro lado, há exceções a esta tendência geral, notando-se, para alguns dos resultados, uma melhoria das

propriedades que, segundo o autor, tem origem nos efeitos de pós-cura da resina. Como referido, a generalidade dos dados corresponde a períodos temporais de envelhecimento curtos (a maioria até 2 anos), havendo uma elevada escassez de dados para horizontes temporais superiores a 10 anos [46].

Para alguns dos estudos cujos dados individuais são apresentados na Figura 7, os respetivos autores também aplicaram o método de previsão de Arrhenius, o que permitiu extrapolar os dados para períodos mais longos. Deste modo, tornou-se possível estimar como iriam evoluir as retenções de diferentes propriedades dos GFRP a longo prazo [46].

Com o intuito de se definir um fator de conversão que fosse conservativo para um horizonte de projeto a longo prazo, os dados resultantes dos modelos de previsão referidos foram comparados com os valores experimentais existentes na bibliografia (anteriormente apresentados na Figura 7). Desta maneira, foi possível avaliar como é que os dados experimentais em estudo poderiam ser extrapolados para horizontes temporais superiores. Este exercício encontra-se representado na Figura 8(a) e Figura 8(b). Nestas figuras, é visível a extrapolação dos dados para dois períodos temporais distintos, um que abrange apenas o intervalo de tempo onde existem dados experimentais disponíveis, e um segundo para um período até 100 anos [46].

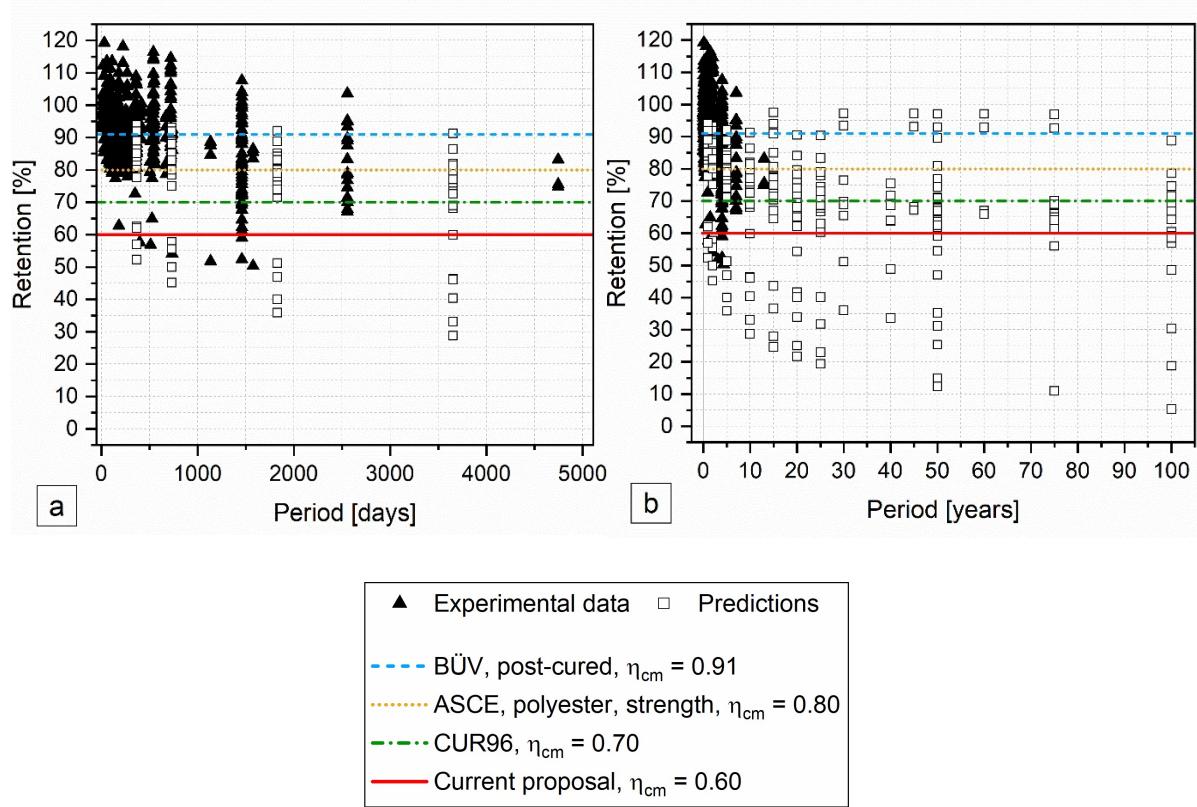


Figura 8 – Comparação entre os dados experimentais e as previsões a longo prazo: a) até 14 anos; b) até 100 anos [46].

Por observação dos gráficos, são identificáveis dois aglomerados de pontos nos dados estimados. Um primeiro (i) onde a globalidade dos valores de retenção das propriedades mantém-se superior a 50%; e um segundo (ii) onde é notória a diminuição das propriedades de retenção para valores inferiores a 50%, logo após 5 anos de exposição. Este segundo aglomerado de pontos apresenta valores

provavelmente excessivamente conservativos (para a generalidade dos compósitos), uma vez que inclui estimativas muito reduzidas e foi associado a materiais de espessuras muito reduzidas, pouco representativas daquilo que serão as espessuras normais em aplicações estruturais em engenharia civil. Assim, por observação da Figura 8(a) e 8(b), conclui-se que a maioria dos dados segue a tendência (i). Sendo assim, é razoável afirmar que este ajuste será o que melhor irá explicar os dados experimentais, não só os previamente adquiridos como os futuros [46].

Nestas figuras, para além de ser possível verificar as tendências referidas, também são apresentados diferentes fatores de conversão adotados por diferentes códigos ou recomendações de dimensionamento. Como é visível, a generalidade das recomendações existentes, aparentam ser pouco conservativas face aos dados experimentais disponíveis: a *guideline* BÜV [64] definiu um fator de conversão de 0,91; a “pré-norma” da ASCE [65] definiu um valor de 0,80; e a recomendação CUR96 [66] estipulou como fator, o valor igual a 0,70. A análise feita por Garrido [46] resultou numa proposta de fator mais conservativo (identificado a vermelho), tomando o valor de 0,60 [46].

O objetivo do desenvolvimento desta dissertação é estudar a durabilidade de GFRP produzidos por infusão a vácuo, constituídos por resinas de poliéster e viniléster – a larga maioria dos dados apresentados acima refere-se a compósitos produzidos por pultrusão. Para isso, e tal como feito em vários dos estudos analisados por Garrido [46], irão ser envelhecidos (de forma acelerada) um conjunto de provetas para posterior testagem, os quais permitirão adquirir um conjunto de dados relativos às suas propriedades para um dado período temporal (relativamente reduzido). Os referidos dados, com recurso ao modelo matemático de Arrhenius e através da metodologia explicada anteriormente, serão extrapolados, com o intuito de se encontrar o ajuste que melhor se adeque a uma correta previsão das propriedades desse material a longo prazo.

Assim, com a concretização deste projeto, será possível contribuir para a obtenção de dados sobre a durabilidade dos materiais compósitos a longo prazo, a qual tem sido um entrave para a aceitação geral e aplicação dos FRP na engenharia civil, especialmente aquando a sua aplicação em cenários onde este material se encontre exposto a um, ou a uma combinação de vários, ambientes de degradação, como a exposição à água e humidade, a soluções alcalinas ou salgadas, a esforços estáticos e dinâmicos, ou a temperaturas extremas [22].

2.4. Considerações finais

No presente capítulo, foi feita uma breve revisão do estado da arte relativo aos materiais compósitos de polímero reforçado com fibras, principalmente GFRP, produzidos por infusão a vácuo. Foram apresentadas as propriedades gerais destes materiais e as suas principais características, bem como as potenciais aplicações em engenharia civil.

Concluiu-se que os FRP em geral, e os GFRP em particular, têm sido largamente utilizados em diferentes domínios da engenharia. No sector da construção, apresentam elevado potencial de utilização, por terem elevadas propriedades mecânicas, leveza, permitirem fácil instalação e reduzidos custos de manutenção; estes materiais são também uma alternativa interessante para complementar ou substituir os materiais tradicionais.

Neste capítulo, foram também revistos e explicados os mecanismos de degradação de compósitos FRP, nomeadamente os associados à suscetibilidade higrotérmica, a efeitos térmicos e à radiação UV, bem como os principais agentes envolvidos nos seus processos de degradação.

O estudo da durabilidade, dos mecanismos de degradação e de como estes afetam as propriedades dos GFRP são um ponto crítico para a aceitação destes materiais no mercado da construção, uma vez que existem ainda poucos dados válidos sobre a sua durabilidade a longo prazo. Este é na verdade, o maior entrave para uma utilização mais generalizada destes materiais neste mercado, uma vez que dificulta o desenvolvimento de regulamentação e recomendações de dimensionamento. Deste modo, o estudo da sua durabilidade é fundamental para promover a utilização destes materiais no sector da construção.

Assim, a presente dissertação tem como principal motivação a recolha de informação válida e o desenvolvimento de conclusões sobre a durabilidade e desempenho dos GFRP a longo prazo, com vista a aplicação em estruturas de engenharia civil, contribuindo para a lacuna de dados existentes e promovendo a sua maior aceitação.

3. Programa experimental

3.1. Considerações iniciais

No presente capítulo, apresenta-se o programa experimental implementado no âmbito desta dissertação. Este capítulo encontra-se dividido em três partes principais. Na primeira, descrevem-se os materiais em estudo, bem como o seu processo de fabrico e as suas principais características, sendo também descrita a metodologia de preparação dos provetas. Na segunda parte, apresentam-se os diferentes ambientes de envelhecimento, sendo feita uma breve descrição de cada um e enunciados os procedimentos experimentais adotados para a sua concretização. Por último, são introduzidos e explicados os diferentes ensaios de caracterização mecânica e termomecânica realizados no programa experimental. O capítulo termina com algumas considerações finais.

3.2. Descrição dos materiais utilizados

Na campanha experimental, foram estudados dois materiais compósitos de GFRP constituídos por matrizes poliméricas distintas – poliéster e viniléster – e por um mesmo reforço de fibra de vidro. Os materiais foram ambos produzidos por infusão a vácuo, pela empresa “Trimarine Compósitos, Lda”, especializada no fabrico de estruturas em materiais compósitos, nomeadamente navios. Nesta secção, apresenta-se uma breve caracterização dos materiais constituintes, facultada pelos vários fornecedores, bem como dos materiais compósitos produzidos.

3.2.1 Fibra de vidro e arquitetura de fibras

Como referido, o reforço fibroso em vidro pode ser produzido e aplicado de diversas formas. Assim, neste projeto, o reforço utilizado nos laminados consistiu em 14 mantas, com três tipologias e disposições distintas: (i) mantas com reforço unidirecional; (ii) mantas com reforço quadriaxial, resultando da combinação de mantas com diferentes orientações para as fibras de vidro (0° , $+45^\circ$, 90° , -45°), tecidas com recurso a fibras de costura (*stitches*), que mantêm as anteriores em posição, tornando-as numa só manta; e (iii) mantas com fibras curtas orientadas aleatoriamente (denominadas CSM – *Chopped Strand Mat*), colocadas em ambas as extremidades do laminado para garantir a formação de uma camada rica em resina junto às superfícies.

A arquitetura de fibras de reforço presentes num compósito é um dos principais fatores que influencia as suas características e desempenho a longo prazo. Como referido no capítulo anterior, a disposição das camadas foi definida de maneira simétrica, sendo que por cada camada a uma dada distância acima do centro geométrico do laminado, foi disposta uma outra camada idêntica, à mesma distância, abaixo desse centro. Desta maneira, adotou-se o *layup* de produção apresentado na Tabela 3B, sendo a espessura prevista resultante de tal disposição de camadas de, aproximadamente, 8 mm. Na Tabela 3A, são também indicadas as propriedades e características (gramagem) de cada camada constituinte do *layup* de produção [67,68].

Tabela 3 – A: Características dos tecidos existentes no layup; B: Layup de produção, adaptado de [67,68].

A: Características dos tecidos existentes no layup					B: Layup de produção	
Designação comercial	Camada	Densidade linear da fibra	Gramagem da fibra	Peso total	Número	Nome do tecido
Q850	0°	600 Tex	180 g/m ²	845 g/m ² (±3%)	1	CSM
	+45°	300 Tex	217 g/m ²		2	L 600
	90°	600 Tex	212 g/m ²		3	L 600
	-45°	300 Tex	217 g/m ²		4	Q 850
	Stitch	76 Tex	10 g/m ²		5	Q 850
L600	0°	2400 Tex	566 g/m ²	623 g/m ² (±3%)	6	L 600
	90°	200 Tex	47 g/m ²		7	L 600
	Stitch	76 Tex	10 g/m ²		8	L 600
CSM	0°	-	300 g/m ²	300 g/m ²	9	L 600
					10	Q 850
					11	Q 850
					12	L 600
					13	L 600
					14	CSM

3.2.2. Resina de poliéster

Como referido, a campanha experimental teve como intuito avaliar as propriedades e, sobretudo, a durabilidade de compósitos de GFRP produzidos com dois tipos de resina. Assim, metade dos provetes foram produzidos com uma resina de poliéster insaturado (contendo poliéster isoftálico e estireno), fornecida pela empresa “Polynt Composites”, denominada “POLYLITE®720-691”. Esta resina é especificamente concebida para a produção por infusão a vácuo, uma vez que apresenta reduzida viscosidade (200-250 mPa.s) e características que permitem controlar as reações exotérmicas de cura. É também adequada para a execução de estruturas de maior dimensão, pois apresenta um *geltime* (período durante o qual é possível trabalhar a resina sem que se iniciem processos de cura) elevado, entre 90 e 110 minutos. Para iniciar a cura da resina, utilizou-se um iniciador/catalisador, denominado peróxido de metiletilcetona (*methyl ethyl ketone peroxide* – MEKP), o qual foi introduzido numa quantidade de 1,5% do volume total da resina [69].

Na Tabela 4, apresentam-se os valores típicos, fornecidos pelo fabricante [69], para as propriedades mecânicas e termomecânicas desta resina, testadas de acordo com as diferentes normas indicadas.

Tabela 4 – Propriedades da resina de poliéster, adaptado de [69].

Propriedades	Norma	Resina totalmente curada
Resistência à tração (MPa)	ISO 527 (2012)	76
Módulo de elasticidade à tração (MPa)		3650
Extensão na rotura à tração (%)		3,5
Resistência à flexão (MPa)	ISO 178/B (2010)	140
Módulo de elasticidade à flexão (MPa)		3550
Heat Deflection Temperature - HDT (°C)	ISO 75-2A (2013)	86

3.2.3. Resina de viniléster

A resina de viniléster utilizada nos restantes provetas testados na campanha experimental foi fornecida pela empresa “INEOSComposites” e denomina-se de “DERAKANE™ MOMENTUM 411-200”. De acordo com o fabricante, a sua formulação permite a utilização em aplicações de infusão a vácuo e confere uma excelente resistência a um conjunto variado de substâncias químicas, tais como soluções ácidas e alcalinas [70].

Em termos da sua constituição química, esta é uma resina epóxi bisfenol A, à base de viniléster, que resulta da diluição a 5,5% em monoestireno da resina de viniléster “DERAKANE 411-350”, originando um produto final com viscosidade mais reduzida (“DERAKANE™ MOMENTUM 411-200”). Na composição da matriz polimérica, foram também utilizados os seguintes componentes: dimetilanilina (N-Dimethylaniline – DMA), que tem como função acelerar a reação e permitir a cura a temperatura ambiente; octoato de cobalto (Co-Oct 1%), que garante uma cura correta e o endurecimento até ao estado sólido; 2,4-Pantanodiona, que funciona como retardador; e peróxido de metiletilcetona (MEKP Ketanox), que, como referido, é um iniciador/catalisador.

As quantidades adotadas para cada um destes componentes resultaram de um conjunto de iterações que tiveram por base os resultados obtidos em ensaios preliminares (incluindo de infusão) efetuados com esta resina. Assim, adotou-se para a resina de viniléster, as quantidades dos componentes apresentados na Tabela 5, que permitiram obter um *geltime* de 105 minutos.

Tabela 5 – Aditivos adotados para a produção (a 25 °C) da resina de viniléster, adaptado de [70].

Constituinte	Quantidade
MEKP Ketanox (%)	1,5
DMA (%)	0,025
Co-Oct 1% (%)	0,3
2,4-Pantanodiona (%)	0,025

Na Tabela 6, apresentam-se os valores fornecidos pelo fabricante [70] para as propriedades mecânicas e termomecânicas mais relevantes da resina de viniléster, de acordo com as normas ISO indicadas.

Tabela 6 – Propriedades da resina de viniléster, adaptado de [70].

Propriedades	Norma	Resina totalmente curada
Resistência à tração (MPa)	ISO 527 (2012)	86
Módulo de elasticidade à tração (MPa)		3200
Extensão na rotura em tração (%)		5
Resistência à flexão (MPa)	ISO 178/B (2010)	150
Módulo de elasticidade à flexão (MPa)		3400
Temperatura de transição vítreia (°C)	ISO 11357	118

3.3. Processo de fabrico dos GFRP

As placas de GFRP foram produzidas em grandes dimensões (1,25x5 m²) e com recurso ao processo de moldagem por infusão a vácuo. Sendo este um processo moroso e, em parte, dispendioso, antes de se iniciar a produção em larga escala das placas de GFRP, foram efetuados vários ensaios e ajustes, em placas de menores dimensões, de forma a evitar desperdícios. Estes testes permitiram avaliar as seguintes propriedades associadas à composição da resina: capacidade de impregnação das fibras; viscosidade e *geltime*; temperatura e duração necessárias à cura; temperatura gerada durante a gelificação e cura da resina. Desta maneira, foi possível avaliar como é que as diferentes resinas e suas composições se comportam durante o processo de impregnação das fibras.

A Figura 9 ilustra um teste de infusão a vácuo num painel de menores dimensões. Nesta figura, é visível a aplicação de dois tubos, um que permite a remoção de ar do saco de vácuo e outro que, devido ao gradiente de pressão, permite a entrada de resina para o interior do molde. Com este ensaio, foi possível determinar os parâmetros referidos, avaliando o modo como a resina fluiu ao longo do painel de GFRP e monitorizando os diferentes momentos em que cada secção se encontrava saturada. Assim, foi possível melhorar a composição de cada resina em função dos parâmetros desejados.

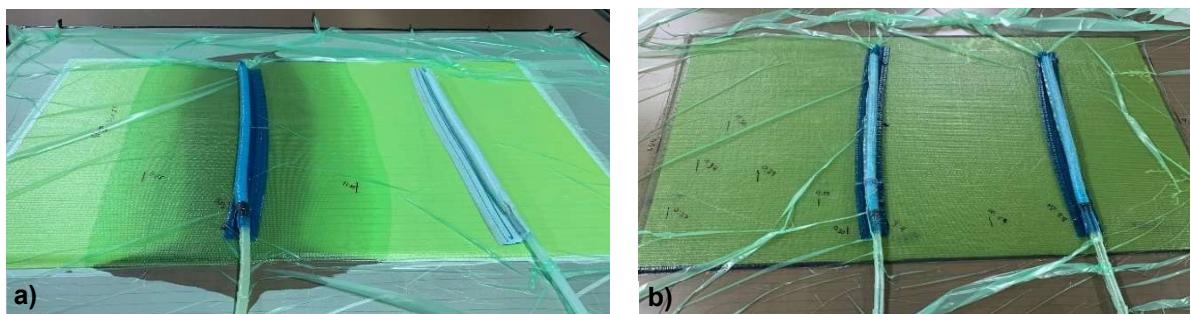


Figura 9 – Teste de Infusão: (a) início da impregnação da resina; (b) fibras totalmente saturadas em resina.

Após execução dos testes referidos, realizados para as duas resinas em estudo e após algumas iterações, encontrou-se aquela que se julgou ser a composição ótima de cada resina (como descrito anteriormente) e que permitiria a correta produção do GFRP pelo processo de infusão a vácuo.

Posto isto, foi então possível passar a uma produção de maior escala dos painéis de GFRP. Para tal, com recurso a mesas de moldagem de grandes dimensões, colocou-se a disposição definida para o reforço das fibras de vidro, em conjunto com o respetivo material consumível necessário ao processo de infusão a vácuo. Seguidamente, foram instalados os tubos que permitiram a entrada de resina dos tanques (previamente preparados com a resina a utilizar) e os tubos ligados a uma bomba para extração de ar. O aspeto final desta montagem foi o apresentado na Figura 10.

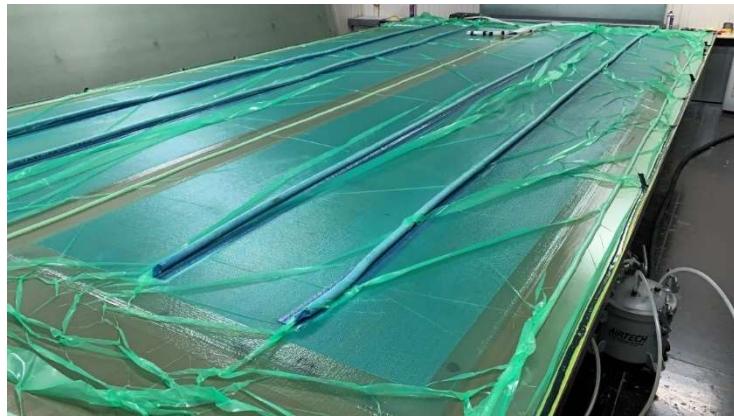


Figura 10 – Aspetto final de um painel de GFRP de grandes dimensões.

Após a injeção da totalidade da resina e verificando-se a correta impregnação das fibras, aguardou-se que a cura inicial a temperatura ambiente decorresse. Posteriormente, foi efetuada uma pós-cura a 80 °C durante 12 horas. Este regime foi definido de forma iterativa, com base em análises mecânicas dinâmicas (DMA) de provetas sujeitos a diferentes regimes de pós-cura.

Ainda nas instalações da Trimarine, estas placas foram cortadas noutras de menores dimensões, com 700x250 mm² e 400x250 mm², necessárias para diferentes ensaios. Estas dimensões foram definidas com o intuito de facilitar o transporte e o processo de envelhecimento.

3.4. Descrição e preparação dos ambientes de envelhecimento

O projeto no âmbito do qual a presente dissertação se enquadra (“Durable-FRP”) tem como objetivo caracterizar, do ponto de vista mecânico e termomecânico, a durabilidade de compósitos GFRP produzidos por infusão a vácuo, com resinas de dois tipos: poliéster insaturado e viniléster. Para tal, procedeu-se de duas maneiras: (1) testou-se o material sem envelhecimento, possibilitando a determinação das suas propriedades num estado virgem; e (2) colocou-se o material a envelhecer, sob diferentes condições, com o intuito de estudar a degradação das mesmas propriedades.

Assim, no âmbito daquele projeto, foram utilizados os seguintes ambientes de envelhecimento: (1) imersão em água desmineralizada a diferentes temperaturas, 20 °C, 40 °C e 60 °C; (2) efeito isolado da temperatura, -15 °C, 20 °C, 40 °C e 60 °C (em câmaras térmicas com humidade relativa medida, mas não controlada); (3) ciclos gelo-degelo, entre -15 °C e 20 °C; (4) ciclos térmicos, entre -15 °C e 20 °C; (5) envelhecimento acelerado em câmara QUV, com radiação ultravioleta, temperatura elevada e humidade relativa também elevada; e (6) envelhecimento natural em diferentes zonas de Portugal Continental.

Na presente dissertação, apenas foram testados experimentalmente os ambientes (1) e (2), para os quais a durabilidade está a ser avaliada para os seguintes períodos de envelhecimento: ambiente (1), por 3 e 6 meses (no âmbito do projeto, serão também estudados períodos de 12 e 24 meses, e 5, 10 e 20 anos); ambiente (2), por 6 meses (no projeto, será avaliado o efeito de 12 e 24 meses, e 5 ou 10 anos).

Do ponto de vista da preparação dos diferentes ambientes, particularmente para a imersão do material em água destilada (ambiente (1)), foram utilizados 3 tanques plásticos (câmaras de imersão) de dimensões 900x600x500 mm³, os quais foram envolvidos em esferovite (Poliestireno Expandido – EPS), pelo exterior, com o intuito de minimizar as perdas térmicas. No interior destes tanques, foram então colocadas as placas do GFRP em estudo, separadas entre si por espaçadores, permitindo a exposição da superfície do material, de forma uniforme, ao meio aquoso em questão. Introduziu-se apenas a quantidade de água desmineralizada necessária para cobrir o material e mais uma certa quantidade para garantir que, mesmo após alguma evaporação, o material permaneceria totalmente imerso. Posto isto, foi então introduzida uma resistência elétrica com controlador no interior de cada um dos tanques com a finalidade de elevar e manter a temperatura da água nos diferentes valores acima definidos.

As placas de GFRP envelhecidas nas condições descritas requereram também uma preparação prévia das mesmas, tendo sido sujeitas a um processo de pintura das suas faces laterais, com uma tinta epoxídica (Icosit K-101N). Esta pintura teve como objetivo minimizar a penetração de água pelas suas faces laterais, promovendo a absorção unidirecional de água pela superfície do material.

Outro aspeto importante de referir é que, em cada fase de remoção de material, foram retiradas sempre duas placas para cada tipo de resina. O objetivo deste procedimento foi manter uma placa saturada (sendo esta mantida imersa em água até à sua testagem) e outra num estado seco (*Dry*), em que o material teve de adquirir massa constante, ou seja, a água absorvida durante o envelhecimento foi evaporada, previamente à testagem. Ao proceder deste modo, foi possível caracterizar o material de duas maneiras distintas. Uma primeira, num estado saturado, sem que haja recuperação das propriedades mecânicas associadas à reversibilidade da natureza de alguns dos mecanismos de degradação física e, um segundo, num estado seco, que permite a recuperação das reações reversíveis, como a plasticização e a dilatação, permitindo assim avaliar os efeitos permanentes do envelhecimento higotérmico.

Quanto à preparação do ambiente de envelhecimento (2), esta foi mais simples. Como apenas se desejava avaliar o efeito da temperatura de forma isolada, introduziu-se a quantidade de material necessária para a respetiva duração do projeto em câmaras térmicas, com a temperatura no seu interior bem definida. Novamente, as placas foram empilhadas com recurso a espaçadores para permitir um correto e uniforme fluxo de calor através da superfície do FRP.

3.5. Corte e preparação dos provetes de GFRP

Todas as placas, envelhecidas ou não, foram cortadas com as dimensões definidas nas normas aplicáveis a cada ensaio, através de uma máquina de corte CNC (*Computer Numerical Control*), instalada no Pavilhão de Matemática do IST. Por se tratar de um material polimérico reforçado com fibra de vidro, foi utilizada uma fresa de carboneto de tungsténio com um revestimento de nitreto de alumínio e titânio, própria para este tipo de materiais, da marca ProCut, com a referência “RFC0300TL”.

Previvamente ao corte, foi necessário fixar as placas de GFRP ao equipamento referido. Começou-se por fixar à máquina de corte uma placa de aglomerado de fibras de madeira de média densidade

(*Medium Density Fiberboard* – MDF), através de um sistema de ganchos metálicos com rosca. Esta placa serviu de base fixadora e de sacrifício. Seguidamente, com recurso a parafusos metálicos (diâmetro e comprimento reduzidos), foi garantida a fixação da placa de GFRP à máquina de corte, colocando-se um parafuso em cada canto da mesma.

Para garantir a correção do corte, ou seja, um corte limpo sem dano no material em estudo ou até mesmo na fresa (por sobreaquecimento), a CNC foi programada para um número de rotações por minuto da fresa de 20000 rpm, e com a velocidade de andamento do mecanismo de corte de 8 mm/s.

O esquema do corte dos provetes teve por base um desenho CAD de cada laminado produzido, em que se tentou garantir o maior aproveitamento da área de placa disponível, cortando-se as quantidades dos diferentes provetes necessários a cada ensaio, com o mínimo de desperdício. Cada corte foi efetuado tendo em conta o tipo de ensaio a efetuar, de acordo com o descrito nas secções 3.7 e 3.8 – tração (T), compressão (C), corte no plano (IP), corte interlaminar (ILSS), flexão (F) e DMA (D) –, as quantidades (mínimas) e as geometrias recomendadas pelas normas aplicáveis a esses ensaios são descritas adiante. Procurou-se garantir que os provetes resultantes do esquema de corte em questão apresentassem faces laterais lisas, todo os ângulos retos, e alinhados com os eixos principais do reforço. A Figura 11 apresenta o esquema de corte CAD e o resultado obtido da CNC, respetivamente. Na Tabela 7 apresenta-se a norma considerada para cada ensaio, bem como a geometria e número de provetes associados, em que “l” e “b” são o comprimento e a largura de cada provete, respetivamente.

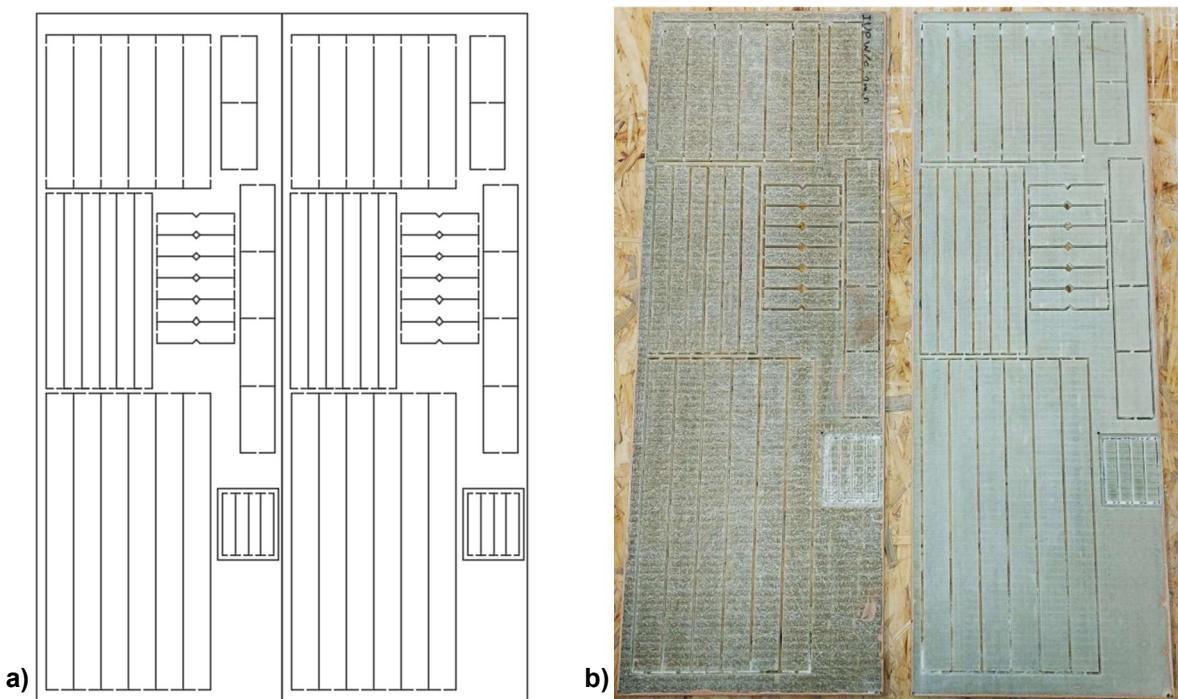


Figura 11 – Placas de GFRP: (a) esquema de corte; (b) resultado após corte na CNC.

Tabela 7 – Informação relativa a cada tipo de ensaio.

Ensaio	Norma Adotada	Nº de Provetes	l (mm)	b (mm)
Tração (0°)	EN ISO 527-4	6	300	25
Compressão	EN ISO 14126	6	153	25
Corte no plano	ASTM D5379	6	76	20
Corte interlaminar	EN ISO 14130	6	65	32,5
Flexão	EN ISO 14125	6	195	15
DMA	ASTM D7028	4	60	10

Posteriormente à realização dos cortes, foi então possível limpar o material e remover os provetes das placas. Como metodologia de organização e para facilitar a identificação dos provetes em teste, estes foram identificados através de representação alfanumérica. Assim, o seguinte exemplo é apresentado como forma explicativa da representação adotada: “P W20 3m D IV”. Neste exemplo, “P” significa resina de poliéster, sendo que para a resina de viniléster foi adotada a letra “V”; “W20” significa envelhecimento higrotérmico em água a 20 °C, sendo que para envelhecimento térmico foi utilizada a letra “T” (foram também testadas outras temperaturas); “3m” identifica o período de envelhecimento a que os provetes foram sujeitos, neste caso “3 meses”; “D” significa “Dry”, (em caso de testagem com o material saturado, não foi utilizada qualquer letra); “IV” identifica, em numeração romana, qual o espécime a ser testado dentro de uma dada série.

3.6. Resumo dos ensaios realizados durante a campanha experimental

A Tabela 8 e a Tabela 9 expõem de forma esquemática a campanha experimental realizada durante o desenvolvimento desta dissertação. Nestas é apresentado o número de provetes testados sem envelhecimento (*unaged*) (Tabela 8) e para os ambientes (1) – imersão em água e (2) – efeito isolado da temperatura (Tabela 9), perfazendo um total de 840 provetes. No entanto, é importante referir que apesar de terem sido realizados os ensaios relativos ao ambiente (2), a sua discussão e análise encontram-se fora do âmbito da presente dissertação.

Tabela 8 – Resumo da campanha experimental realizada para os provetes testados sem envelhecimento (*unaged*).

Resina	Ensaio	<i>unaged</i>
UP	T	6
	C	6
	IP	6
	ILSS	6
	F	6
VE	T	6
	C	6
	IP	6
	ILSS	6
	F	6
Total		60

Tabela 9 – Resumo da campanha experimental realizada para os provetes envelhecidos no ambiente (1) e no ambiente (2).

Resina	Período - Estado	Ensaio	Ambientes de envelhecimento							
			W20	W40	W60	T20	T40	T60	T-15	
UP	3m - W	T	6	6	6	-	-	-	-	
		C	6	6	6	-	-	-	-	
		IP	6	6	6	-	-	-	-	
		ILSS	6	6	6	-	-	-	-	
		F	6	6	6	-	-	-	-	
	3m - D	T	6	6	6	-	-	-	-	
		C	6	6	6	-	-	-	-	
		IP	6	6	6	-	-	-	-	
		ILSS	6	6	6	-	-	-	-	
		F	6	6	6	-	-	-	-	
VE	6m - W	T	6	6	6	6	6	6	6	
		C	6	6	6	6	6	6	6	
		IP	6	6	6	6	6	6	6	
		ILSS	6	6	6	6	6	6	6	
		F	6	6	6	6	6	6	6	
	3m - W	T	6	6	6	-	-	-	-	
		C	6	6	6	-	-	-	-	
		IP	6	6	6	-	-	-	-	
		ILSS	6	6	6	-	-	-	-	
		F	6	6	6	-	-	-	-	
VE	3m - D	T	6	6	6	-	-	-	-	
		C	6	6	6	-	-	-	-	
		IP	6	6	6	-	-	-	-	
		ILSS	6	6	6	-	-	-	-	
		F	6	6	6	-	-	-	-	
	6m - W	T	6	6	6	6	6	6	6	
		C	6	6	6	6	6	6	6	
		IP	6	6	6	6	6	6	6	
		ILSS	6	6	6	6	6	6	6	
		F	6	6	6	6	6	6	6	
Nº total de provetes			180	180	180	60	60	60	60	
			780							

3.7. Caracterização mecânica

Os ensaios de caracterização mecânica tiveram como objetivo definir as leis constitutivas dos materiais, incluindo os módulos e as resistências, para diferentes tipos de solicitações. Na presente dissertação, foram realizados os seguintes ensaios mecânicos: (1) tração; (2) corte no plano (losipescu); (3) corte interlaminar; (4) compressão; (5) flexão. Como equipamentos para a realização destes ensaios, foram utilizadas duas máquinas universais de ensaio, da marca Instron, presentes no Laboratório de Estruturas e Resistência de Materiais (LERM) do IST. A característica que as distingue é a sua capacidade de

carga, sendo que a maior, do modelo Instron 5989-600kN, alcança 600 kN de força, enquanto a menor, do modelo 5982-100kN, atinge 100 kN, ambas com precisão de medição da carga de $\pm 0,5\%$ e de deslocamento de $\pm 0,05\%$ [71]. Desta maneira, a primeira máquina foi escolhida para ensaios em que fosse necessário aplicar cargas maiores para alcançar a rotura, como foi o exemplo dos ensaios de tração e de compressão. Esta máquina tem também uma característica útil, pois é composta por garras de aperto reguláveis óleo-hidráulicamente, muito útil para a fixação dos provetes de tração.

Para os ensaios mecânicos de tração, corte no plano e compressão, foram medidas as deformações no material através de um vídeo-extensómetro (VE), composto por uma câmara de alta-definição SONY XCG-5005E e por uma lente Fujinon - Fujifilm HF50SA-1. Para ser possível a aquisição destes dados, foi necessário marcar em cada provete um conjunto de pontos-alvo, com posições bem definidas e distintas para cada ensaio experimental. Deste modo, tornou-se possível monitorizar as deformações nos provetes, induzidas pela máquina de ensaios. Com o objetivo de criar um maior contraste entre os pontos-alvo e o provete, para obter leituras mais precisas no VE, a zona central dos vários provetes foi pintada com tinta branca em spray, abrangendo não só o local dos pontos-alvo, mas também onde seria expectável que ocorresse a rotura.

Antes de cada ensaio, foram medidas as espessuras e larguras de todos os provetes. Este procedimento teve por objetivo verificar a variabilidade nas geometrias dos provetes e, sobretudo, permitir calcular as respetivas tensões. Esta leitura foi efetuada com recurso a um paquímetro digital, com precisão de $\pm 0,01$ mm. Consoante o tipo de provete, ora se efetuaram três medições para cada grandeza (tração, compressão e flexão), ora se efetuaram apenas duas (corte interlaminar e corte no plano) e uma medição na zona de entalhe (corte no plano). Os valores obtidos para as medições efetuadas de cada provete apresentam uma espessura aproximadamente constante para os laminados com cada tipo de resina, sendo cerca de 6,0 e 6,5 mm ($\pm 0,3$ mm), respetivamente, para os laminados com resina de viniléster e poliéster (valores inferiores aos 8 mm estimados analiticamente).

3.7.1. Ensaio de tração

A norma adotada para o ensaio de tração, EN ISO 527-4 [72], apresenta os métodos necessários para determinar o comportamento dos provetes à tração, bem como as resistências e módulos associados a esta e, ainda, as relações tensão-deformação.

O ensaio consiste em alongar o provete ao longo de seu eixo longitudinal maior, por imposição de uma força de tração, a uma velocidade constante, até que este atinja a rotura [14]. Durante este procedimento, a carga suportada pelo provete e o alongamento sofrido são medidos. Os provetes foram colocados no mecanismo de fixação (garras) da máquina de ensaios Instron 5989-600kN, com especial atenção para que o seu eixo longitudinal estivesse perfeitamente alinhado com o da máquina. Seguidamente, as garras foram apertadas firme e uniformemente, procurando-se garantir que, com a pressão aplicada, não ocorresse fratura ou esmagamento no local de fixação. A velocidade de ensaio foi de 2 mm/min, uma vez que se procurou medir a máxima deformação e o módulo de elasticidade [73].

A norma indica que devem ser testados pelo menos 5 provetes, adotando-se, neste caso, um total de 6 provetes, com o intuito de ter uma unidade de reserva. Tendo em conta o tipo de material em estudo,

foram adotados provetes do Tipo 2, ou seja, retangulares e sem reforço nas extremidades (*tabs*). De acordo com a norma, estes provetes deverão apresentar comprimento superior a 250 mm, largura de preferência de 25 mm e espessura entre 2 e 10 mm, tendo sido adotadas as dimensões de 300x25x6,5 mm. A norma aconselha também que, para materiais compósitos reforçados com fibras, por serem normalmente anisotrópicos, poderá ser relevante efetuar os testes em ambas as direções preferenciais, isto é, com o eixo paralelo e perpendicular [72,73] – na presente dissertação (e no projeto), os provetes de tração foram testados apenas na direção longitudinal, por limitações de material e de tempo.

É importante referir que, após alguns testes iniciais, os provetes apresentavam rotura na zona das garras, tendo sido necessário um aumento da área de fixação, de forma a promover um maior atrito entre a garra e o provete. Desta maneira, o comprimento de provete disponível para fixação na zona da garra foi aumentado (em cada lado) de 70 para 80 mm, mantendo-se uma zona livre entre pontos com comprimento de 90 mm. Deste modo, foi possível obter um modo de rotura válido, com pressão de fixação de 50 bar, garantindo-se a não ocorrência de danos na zona crítica de fixação do provete.

Assim, apresenta-se na Figura 12 uma representação esquemática e uma fotografia real, onde são visíveis, para este ensaio, os pontos-alvos que permitiram medir as deformações ocorridas, bem como a globalidade da geometria deste tipo de provetes.

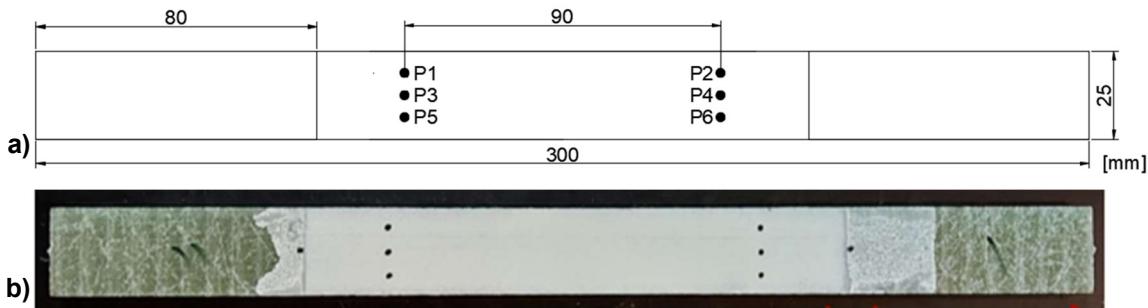


Figura 12 – Ensaio de tração: (a) representação esquemática do provete e sua geometria; (b) imagem real de um provete.

Com o posicionamento dos pontos apresentado, foi possível registar as deformações com recurso ao VE, de acordo com três alinhamentos de pontos (ilustrados na Figura 12(a)): (1) P1-P2; (2) P3-P4; (3) P5-P6. Após o ensaio, foram efetuados os cálculos necessários a estimar as propriedades mecânicas do material, com base na força aplicada ao provete (fornecida pela célula de carga da máquina de ensaios) e na variação da distância compreendida entre os seis pontos-alvo [72]. Assim, a resistência à tração (σ_t), em MPa, de cada provete foi obtida através do resultado do quociente entre a força máxima registada (F_t), em N, e a área inicial da secção transversal (A_0), em mm^2 (Equação (1)) [72].

$$\sigma_t = \frac{F_t}{b \times h} = \frac{F_t}{A_0} \quad (1)$$

A extensão de rotura em tração (ε_t), que pode ser apresentada sobre a forma de percentagem ("%), foi obtida pelo quociente entre a variação do comprimento existente entre os pontos-alvo da amostra

(ΔL_0) e o comprimento de referência do provete (L_0), ambos expressos em milímetros (Equação (2)) [72].

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta L_0}{L_0} \quad (2)$$

O módulo de elasticidade em tração (E_t), em MPa, resulta do quociente entre (i) a diferença entre dois valores de tensão (σ_2 e σ_1), obtidos da parte inicial e linear da curva tensão-deformação, e (ii) a diferença entre as respetivas deformações, definidas à priori (a norma sugere a consideração de $\varepsilon_2 = 0,0025$ (0,25%) e $\varepsilon_1 = 0,0005$ (0,05%), contudo, por motivos de existência de maior intensidade de ruído no início da aquisição de dados, considerou-se $\varepsilon_2 = 0,005$ (0,5%) e $\varepsilon_1 = 0,001$ (0,1%)) (Equação (3)) [72]. Para estimar este valor, foi efetuada uma regressão linear das tensões e deformações naquele intervalo, tendo-se garantido previamente a linearidade da resposta de cada provete.

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (3)$$

3.7.2. Ensaio de compressão

Com o intuito de avaliar as propriedades mecânicas à compressão do material GFRP em estudo, considerou-se a norma EN ISO 14126 [74]. Esta norma especifica os métodos necessários a adotar para a determinação das propriedades de compressão. O método aí referido tem como princípio a aplicação de uma força axial, imposta ao longo da direção longitudinal de um provete retangular, com 153x25x6,5 mm, que se encontra preso num dispositivo de fixação, como representado na Figura 13, apresentando uma zona central visível com 29 mm de comprimento [74].



Figura 13 – Ensaio de compressão - imagem real do mecanismo de testagem.

A carga de compressão é simultaneamente imposta diretamente às extremidades do provete e às suas faces laterais, que se encontram seguras pelo referido mecanismo, e para as quais é transferida carga por atrito. À medida que a carga é aplicada, a uma velocidade constante de 1,3 mm/min, a deformação na zona central que se encontra livre é registada, até se atingir, por fim, a rotura [74].

Uma vez que é necessário medir a deformação ocorrida no provete até à rotura, e que tal medição é efetuada na zona central, com o apoio da ferramenta VE, foi novamente necessário proceder à marcação de pontos-alvo. Assim, como resultado final, obteve-se, para os provetes com as dimensões

153x25x6,5 mm, a respetiva localização de pontos-alvo apresentada na Figura 14. Para cada ensaio, são necessários, no mínimo, 5 provetes, tendo sido testados um total de 6 provetes [74].

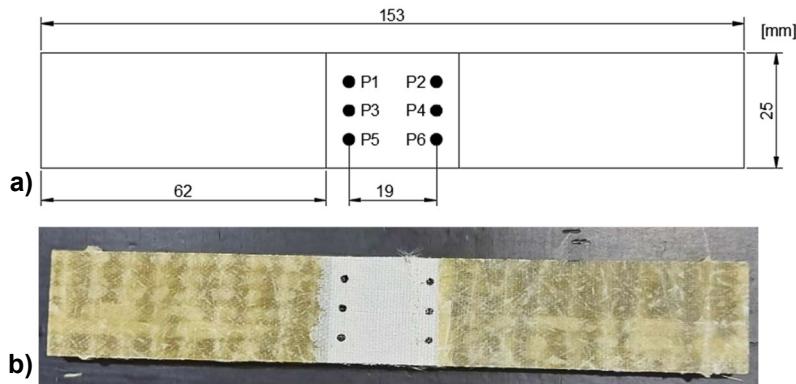


Figura 14 – Ensaio de compressão: (a) representação esquemática do provete e sua geometria; (b) imagem real de um provete.

Como é visível na Figura 14, marcaram-se seis pontos-alvo que, como referido, permitiram registar os deslocamentos ocorridos devido ao carregamento durante o ensaio. Assim, a deformação por compressão foi medida através dos seguintes alinhamentos: P1-P2; P3-P4 e P5-P6 [74].

Neste ensaio, é particularmente importante garantir que as extremidades do provete se encontram tão lisas quanto possível. Deste modo, garante-se que o carregamento é introduzido ao longo do eixo central do provete e que o esmagamento local nas extremidades, resultantes de um contacto não uniforme, é evitado [14].

Para obter os valores das propriedades mecânicas e à semelhança do definido para as resistências à tração e ao corte no plano, a resistência à compressão (σ_c), em MPa, foi obtida através do quociente entre a força máxima de compressão resistida pelo provete (F_c), em N, e a área da secção transversal inicial do provete (A_0), mm^2 , como apresentado na Equação (4)[74].

$$\sigma_c = \frac{F_c}{b \times h} = \frac{F_c}{A_0} \quad (4)$$

O módulo de elasticidade em compressão (E_c), expresso em MPa, foi determinado com base em dois valores de deformação predefinidos (a norma sugere $\varepsilon_c'' = 0,0025$ e $\varepsilon_c' = 0,0005$, mas pelos motivos referidos anteriormente considerou-se $\varepsilon_c'' = 0,005$ (0,5%) e $\varepsilon_c' = 0,001$ (0,1%)) e nas respetivas tensões associadas (σ_c'' e σ_c'), MPa, correspondendo a um comportamento do material aproximadamente linear (Equação (5)) [74]. Tal como no ensaio de flexão, foi efetuada uma regressão linear para um dado troço da curva tensão-extensão em que o comportamento foi efetivamente linear.

$$E_c = \frac{\sigma_c'' - \sigma_c'}{\varepsilon_c'' - \varepsilon_c'} \quad (5)$$

3.7.3. Ensaio de corte no plano (Iosipescu)

Com o intuito de estudar as propriedades do material quando sujeito ao corte no plano, considerou-se a norma ASTM D5379 [75]. Os métodos presentes nesta norma permitem obter as seguintes propriedades: (1) resistência (última) ao corte; (2) distorção na rotura; (3) módulo de distorção.

A norma define que deverão ser testados pelos menos 5 provetes de cada material, tendo sido utilizados um total de 6. Quanto à sua geometria, cada provete deverá apresentar uma forma plana e retangular, com entalhes em forma de "V", simétricos e localizados centralmente. Se o material esmagar nas zonas de aplicação de carga, em vez de fraturar entre os entalhes, a norma aconselha a colocação de *tabs* (pequenas chapas metálicas que irão aumentar a resistência local ao esmagamento). As dimensões definidas e adotadas para os provetes de ensaio ao corte no plano são 76x19x6,5 mm, com uma distância entre entalhes de 11,4 mm, e encontram-se representadas na Figura 15(a) [75].

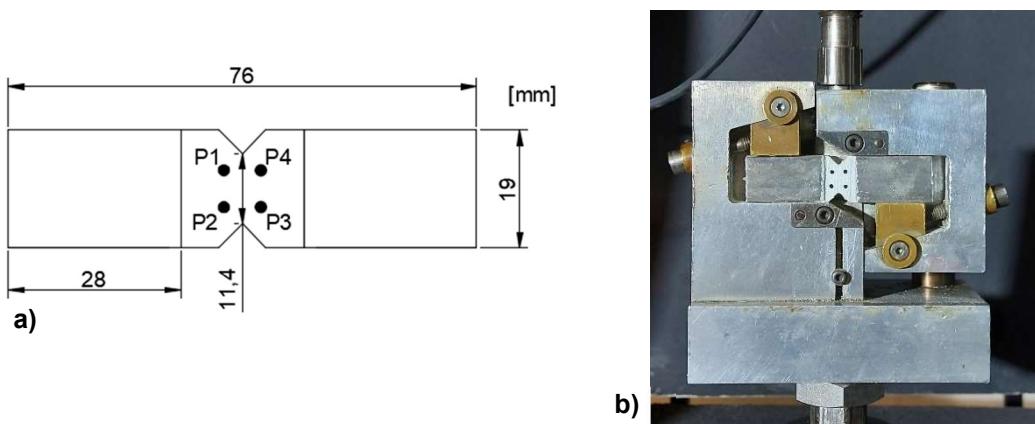


Figura 15 – Ensaio de corte no plano (Iosipescu): (a) representação esquemática do provete e sua geometria; (b) imagem real do mecanismo de testagem.

Neste caso, o VE mediu o deslocamento de quatro pontos-alvo (representados na Figura 15(a)), até atingir a eventual rotura. O provete foi inserido no mecanismo apresentado na Figura 15(b) (também este definido na norma), que é constituído por 2 módulos independentes. Estes, quando comprimidos, exercem tensões de corte no plano do provete, causando uma deformação captada pelo VE. Na aquisição de dados da deformação foi considerado o quadrado definido pelos pontos P1 a P4, distando 6 mm entre si [75].

A velocidade de ensaio deve ser tal que permita aplicar uma taxa de deformação (distorção) quase constante na secção monitorizada; segundo a norma, essa velocidade deverá ser de pelo menos 2 mm/min, tendo sido esse o valor adotado [75].

Devido à elevada resistência ao corte apresentada pelos compósitos GFRP utilizados na presente dissertação, o material, quando sujeito a tensões de corte, apresentava rotura por esmagamento nas secções laterais, de aplicação de carga (Figura 16(a)), em vez da rotura por corte na zona do entalhe. Desta maneira, com o intuito de aumentar a resistência ao esmagamento dos provetes, aplicaram-se tabs nas suas quatro faces (fora da zona do entalhe, representado na Figura 16(b)), com dimensão normalizada (25x18,5x0,7 mm). Assim, a resistência local aumentou, permitindo a obtenção de modos de rotura válidos.

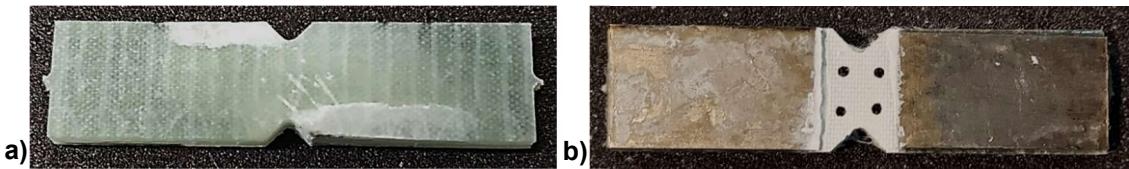


Figura 16 – Ensaio de corte no plano (Iosipescu): (a) rotura do provete por esmagamento das faces laterais; (b) provete reforçado com tabs.

Novamente, os dados obtidos incluem a força aplicada ao provete e as coordenadas dos pontos-alvo. Assim, para determinar as propriedades mecânicas do material, foi necessário efetuar alguns cálculos [75]. Primeiramente, para obter a resistência ao corte (τ), em MPa, foi necessário dividir a força máxima aplicada ao provete no decorrer do ensaio (F_i), em N, pela área da secção transversal inicial do provete medida na secção do entalhe (A_0), definida em mm^2 (Equação (6)) [75].

$$\tau = \frac{F_i}{b \times h} = \frac{F_i}{A_0} \quad (6)$$

A distorção na rotura (γ) foi calculada através da soma das extensões apresentadas pelas diagonais formadas pelos pontos-alvo. Assim, foi possível determinar este valor através da soma das extensões ao longo das diagonais referentes aos pontos-alvo interiores, respetivamente, P1 e P3 ($\varepsilon_{(-45^\circ)}$) e P2 e P4 ($\varepsilon_{(+45^\circ)}$) (Equação (7)) [75].

$$\gamma = \varepsilon_{(+45^\circ)} + \varepsilon_{(-45^\circ)} \quad (7)$$

Quanto ao módulo de distorção (G), determinado em MPa, este resulta do rácio entre a diferença das tensões de corte obtidas de dois pontos previamente definidos (τ_2 e τ_1) e a diferença entre os respetivos valores de distorção associados (γ_2 e γ_1). A escolha destes valores corresponderá a uma gama de tensões-deformações em que o comportamento do material se apresenta como linear (Equação (8)) [75].

$$G = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\gamma_2 - \gamma_1} = \frac{\Delta\tau}{\Delta\gamma} \quad (8)$$

3.7.4. Ensaio de corte interlaminar

A norma EN ISO 14130 [76] permite determinar a resistência ao corte interlaminar de um material compósito polimérico reforçado com fibras. O método utilizado para esse efeito é um ensaio de flexão num vão suficientemente curto (“*short-beam*”).

Este método consiste em sujeitar um provete de secção transversal retangular a um esforço de flexão, num esquema de viga simplesmente apoiada. Para tal, foi utilizado o método de ensaio de flexão em três pontos (desenvolvido em maior detalhe em 3.7.5.), com um vão entre apoios muito reduzido. Desta maneira, o valor de tensão ao corte aumentará bastante quando comparado com a tensão axial de flexão, promovendo a rotura ao corte interlaminar. Como resultado da aplicação de um esforço de corte rasante, as camadas constituintes do material irão sofrer delaminação [76].

É importante frisar que o valor obtido para essa tensão será um valor “aparente”, uma vez que apenas se refere à quantidade medida (em que se considera um valor médio) e não a um valor absoluto (que varia na altura da secção) [76].

A configuração adotada para o sistema de ensaio é a ilustrada na Figura 17, em que o comprimento do vão foi definido como cinco vezes a espessura média dos provetes ($\pm 0,3$ mm) [76].

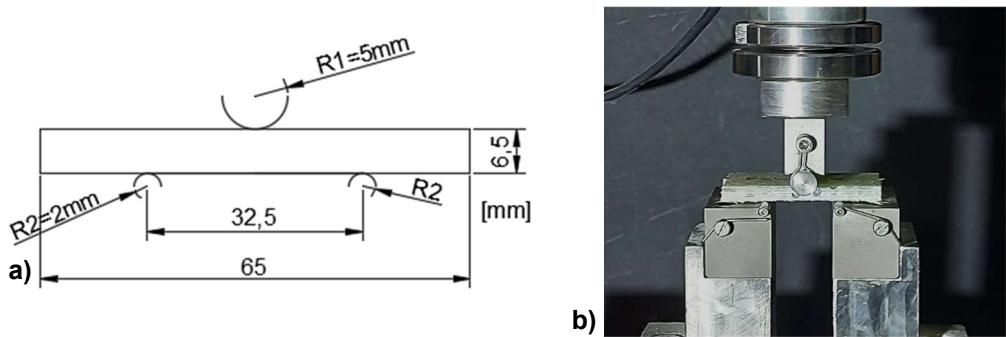


Figura 17 – Ensaio de corte interlaminar: (a) representação esquemática do mecanismo de testagem; (b) imagem real do mecanismo de testagem.

A velocidade de ensaio foi mantida constante em 1 mm/min e, tal como é indicado nas normas já referidas, deverão ser testados pelo menos 5 provetes de cada material, tendo-se novamente adotado um total de 6 unidades [76]. As dimensões do provete foram ajustadas consoante as sugestões fornecidas pela norma. Desta maneira, adotou-se uma geometria em que o comprimento e a largura do provete são respetivamente dez e cinco vezes superior à espessura do material, obtendo-se assim as dimensões de 65x32,5x6,5 mm, apresentadas na Figura 18 [76].

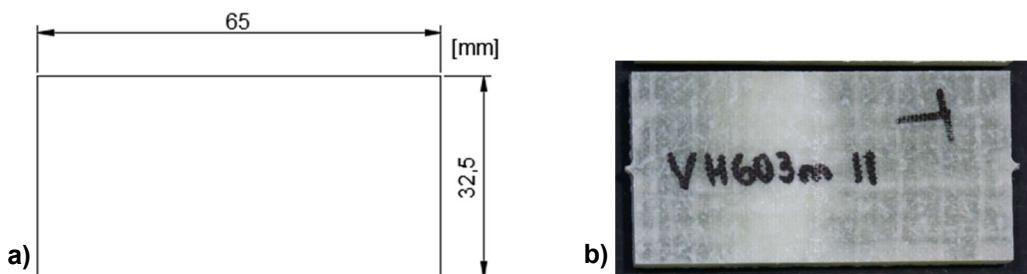


Figura 18 – Ensaio de corte interlaminar: (a) representação esquemática do provete e sua geometria; (b) imagem real de um provete.

Entre os cuidados a ter na realização deste ensaio, destaca-se a colocação simétrica e alinhamento do provete em relação ao sistema de ensaio e, também, a aplicação da carga de forma uniforme ao longo da sua largura, a meio vão e paralelamente aos apoios [76]. Os dados obtidos neste ensaio permitiram obter a força máxima aplicada ao provete. Assim, com o objetivo de determinar a resistência ao corte interlaminar do material (σ_{sbs}), em MPa, com base na carga máxima (F), em N, e na área da secção inicial (A_0), em mm^2 , é possível obter este valor através da Equação (9) [76]:

$$\sigma_{sbs} = \frac{3}{4} \times \frac{F}{b \times h} = 0,75 \times \frac{F}{A_0} \quad (9)$$

3.7.5. Ensaio de flexão

A norma EN ISO 14125 [77] especifica os métodos normalizados para determinar as propriedades à flexão de materiais compósitos reforçados com fibras. Na presente campanha experimental foi adotado o método A, que consiste num ensaio de flexão em três pontos. Adotou-se uma taxa de aplicação de carga constante de 5 mm/min, até ser atingida a rotura ou um dado valor de deformação predeterminado. Com a utilização deste método, é possível avaliar o comportamento do material à flexão, sendo possível definir a sua resistência máxima para este tipo de solicitação, bem como os respetivos módulos e relações de tensão-deformação [77].

Com base no descrito na norma, definiram-se as dimensões do vão do sistema de ensaio. O valor deste vão é dependente da classe do material (de I a IV), sendo que, neste caso, o material será de classe III (específico para sistemas de fibra de vidro). Identificada a classe, é assim definida a relação que permite obter o vão, sendo esta $L = 20h$. Deste modo, assumindo 6,5 mm para a espessura do provete (h), conclui-se que o vão a adotar (L) deveria ser igual a 130 mm. Por consulta da norma, definiu-se também as dimensões do provete como sendo iguais a 195x15x6,5mm [77]. Apresenta-se, na Figura 19, um esquema do mecanismo de ensaio e uma imagem real do mesmo, incluindo as dimensões do provete.

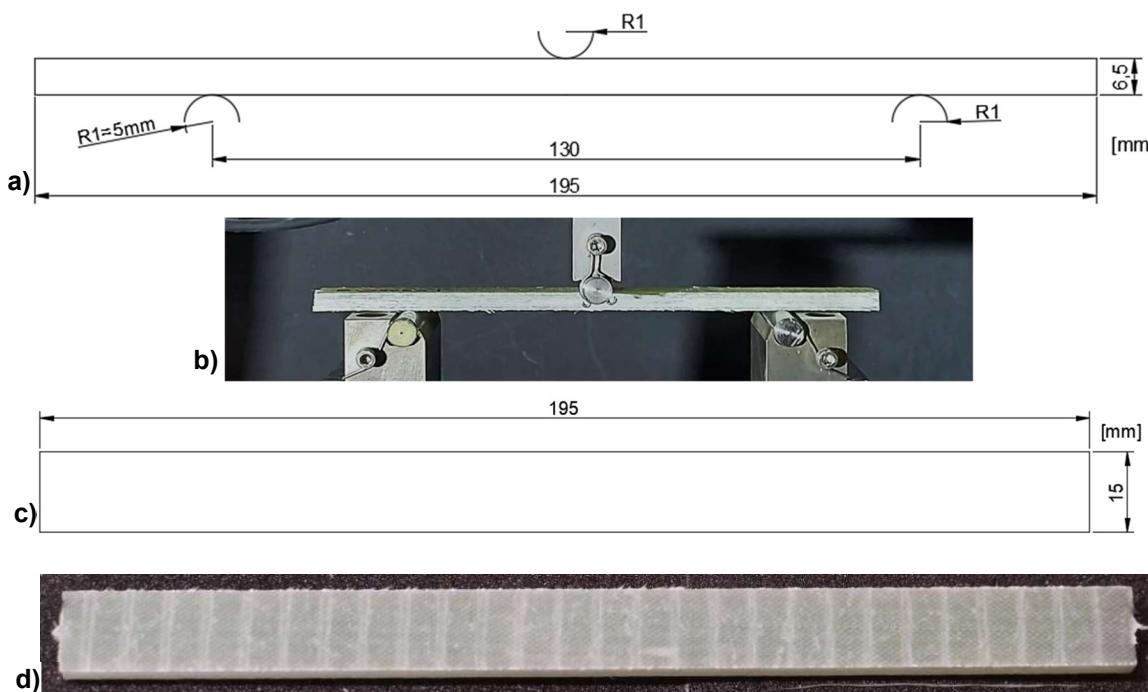


Figura 19 – Ensaio de flexão: (a) representação esquemática do mecanismo de testagem; (b) imagem real do mecanismo de testagem; (c) representação esquemática do provete e sua geometria; (d) imagem real de um provete.

Em termos de procedimento de ensaio, o provete foi colocado simetricamente entre os dois apoios e a carga foi aplicada precisamente a meio do comprimento do vão [77]. Para caracterizar o comportamento mecânico à flexão deste material, foi determinada a resistência à flexão (σ_f), em MPa, determinada pela Equação (10), com base na máxima carga suportada pelo provete (F), em N, no comprimento do vão (L), na espessura (h) e na largura (b) de cada provete, todos expressos em mm [77].

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (10)$$

É também possível determinar o módulo de elasticidade à flexão (E_f), em MPa, que é dependente da variação da flecha (Δs), sendo s'' e s' as deflexões ocorridas no meio vão do provete (viga), em mm, e da respetiva carga (F), em N, associada a cada um destes pontos, de acordo com a Equação (11) [77]:

$$E_f = \frac{L^3}{4bh^3} \left(\frac{\Delta F}{\Delta s} \right) \quad (11)$$

Os valores de s'' e s' são determináveis pelas expressões apresentadas na Equação (12), em que as deformações ε_f'' e ε_f' tomam os valores 0,0025 e 0,0005, respetivamente [77].

$$s' = \frac{\varepsilon_f' L^2}{6h} \quad e \quad s'' = \frac{\varepsilon_f'' L^2}{6h} \quad (12)$$

Nesta dissertação, optou-se por não determinar o valor do módulo de elasticidade em flexão, pelo facto de a metodologia acima referida não ter em conta a deformabilidade local do material nas zonas de aplicação da carga e nos apoios e, por isso, fornecer apenas uma estimativa com precisão limitada daquela propriedade.

3.8. Caracterização termomecânica – ensaio de análise mecânica dinâmica

A caracterização termomecânica de um material pode ser efetuada, por exemplo, através de ensaios de análise mecânica dinâmica (DMA). Este tipo de ensaios permite determinar uma das principais propriedades termofísicas dos materiais compósitos, a temperatura de transição vítreia (T_g). Como referido no capítulo 2, é esta temperatura (de referência) que marca a transição do material de um estado vítreo para um estado borrachoso, envolvendo um decaimento nas propriedades mecânicas [78]. A norma ASTM D7028 [79] apresenta os procedimentos experimentais necessários à determinação da T_g .

Nos ensaios de DMA, os provetes são sujeitos a uma oscilação mecânica sinusoidal com frequência fixa, em simultâneo com um aumento da temperatura a taxa constante. À medida que a carga e a temperatura são aplicadas, registam-se os valores das amplitudes dos ciclos de carga e de deformação e medem-se os respetivos ângulos de fase, entre ciclos. Quando ambas as curvas se encontram sobrepostas, a área resultante da sua sobreposição representa a contribuição elástica para a rigidez, que é denominada de módulo de armazenamento (E'). Esta grandeza representa a máxima energia armazenada durante um ciclo de carga. Quanto às áreas associadas à não sobreposição das curvas, estas representam o contributo da fase viscosa para a deformação, que está associado ao módulo de perda (E''). Por oposição a E' , o módulo de perda reflete a energia que é dissipada durante um ciclo de carregamento. A diferença de fases entre a tensão dinâmica e a extensão dinâmica é identificada pelo símbolo δ e designa-se por ângulo de fase. Este fator permite caracterizar o material quanto à sua viscosidade, sendo que o mesmo toma o valor 0° para materiais perfeitamente elásticos, e 90° para materiais perfeitamente viscosos. A tangente deste ângulo, também denominada por fator de perda e representada por $(\tan \delta)$, é um indicador do amortecimento do material e pode ser obtido pelo rácio entre E'' e E' [78].

É importante referir que a T_g determinada pelo ensaio de DMA é dependente da taxa de aquecimento e da frequência oscilatória, sendo que para maiores valores de ambas, maiores são as estimativas obtidas para a T_g . Assim, com o intuito de se poder comparar os resultados obtidos, é necessário uniformizar as condições de ensaio, pelo que a norma estabelece uma taxa de aquecimento de 2 °C/min e uma frequência de 1 Hz [79].

A temperatura que marca o início do decaimento abrupto de E' corresponde a uma estimativa possível da T_g ; por definição da norma, esta estimativa da T_g deverá ser obtida da interseção de duas linhas tangentes do gráfico do ensaio de DMA; de acordo com a CEN/TS 19101: 2022 [48], esta construção deve ser efetuada num gráfico semi-logarítmico entre o módulo de armazenamento (escala logarítmica) e a temperatura (escala linear) [78]. É de referir que quer o E'' quer a $\tan \delta$ apresentam picos a temperatura elevada, que também fornecem estimativas da T_g (superiores à obtida pelo E').

De acordo com a norma ASTM D7028 [79], é necessário testar pelo menos 2 provetes, tendo sido adotados um total de 4, com dimensões normalizadas, neste caso 60x10x4,5 mm, garantindo que a maior direção do provete está alinhada com a direção principal das fibras, como se ilustra na Figura 20.

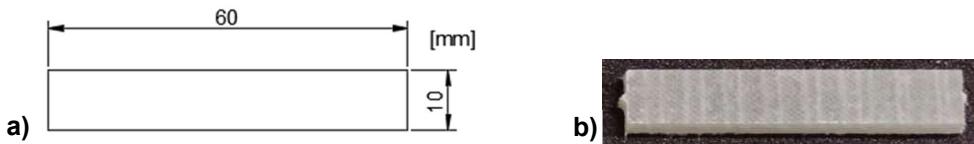


Figura 20 – Ensaio de DMA: (a) representação esquemática do provete e sua geometria; (b) imagem real de um provete.

Como é notório, a espessura deste provete é bastante inferior à dos restantes (cerca de 1/3 menor), por ser essa a espessura máxima permitida pelo equipamento utilizado. Desta forma, para conferir a referida espessura ao provete, foi necessário, com a ajuda de uma fresa indicada para o efeito, desgastar uma das superfícies, removendo aproximadamente 2 mm desta. Para tal, a máquina de corte de CNC foi programada com uma velocidade de 17500 rpm, movendo-se a uma velocidade de 2,5 mm/s, garantindo a correta remoção e limpeza da superfície destes provetes.

Quanto aos ciclos de carga, no que diz respeito à temperatura, os ensaios foram iniciados à temperatura ambiente de 25 °C (devendo essa temperatura ser inferior à estimativa da T_g em pelo menos 50 °C) e concluídos para uma temperatura de 200 °C (devendo ser superior a essa estimativa em pelo menos 50 °C).

Os ensaios de DMA apresentados na presente dissertação foram realizados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), com o apoio da Engenheira Susana Cabral da Fonseca, num equipamento denominado “DMA Q800”, da marca TA Instruments.

3.9. Considerações finais

No presente capítulo, foi descrito o programa experimental desta dissertação e o seu enquadramento no projeto “Durable-FRP”. Este programa consistiu na testagem de provetes virgens e envelhecidos,

com o intuito de melhor definir a durabilidade dos compósitos GFRP em estudo no que se refere à evolução de diferentes propriedades mecânicas e termomecânicas.

Começou-se por apresentar uma breve descrição das propriedades dos materiais constituintes e do processo de fabrico dos dois tipos de compósitos GFRP em estudo, com resinas de poliéster insaturado e viniléster.

Quanto ao envelhecimento dos provetes, no âmbito do projeto “Durable-FRP”, este está a ser feito através de diferentes ambientes de exposição, nomeadamente os seguintes: imersão em água a diferentes temperaturas, temperatura aplicada de forma isolada, ciclos térmicos, ciclos gelo-degelo, envelhecimento ambiental acelerado em câmara QUV, e envelhecimento ambiental natural. As placas dos diferentes GFRP serão expostas aos ambientes de envelhecimento por períodos temporais entre 3 meses e 20 anos, sendo que para a presente dissertação, o estudo da durabilidade do material será feito apenas para 3 e 6 meses e considerando os efeitos da imersão em água e da temperatura.

Posteriormente, foram explicados os principais procedimentos associados ao corte e à preparação dos provetes, utilizando uma ferramenta de corte automático CNC, sendo os mais importantes, a escolha de uma fresa indicada ao tipo de material a cortar, uma definição ponderada da velocidade e profundidade do corte, e uma boa fixação das placas de GFRP ao equipamento de corte.

Por último, foram apresentados os procedimentos experimentais mais importantes recomendados nas normas relativas aos ensaios mecânicos e termomecânicos realizados na campanha experimental. Em particular, para cada tipo de ensaio, foram indicadas as geometrias dos provetes, o tipo e dimensões dos mecanismos de testagem, a velocidade de ensaio e o número de provetes a testar. Apresentaram-se ainda as expressões utilizadas para a obtenção das diferentes propriedades mecânicas dos GFRP em estudo.

4. Resultados e discussão

4.1. Considerações iniciais

No presente capítulo, são analisados e discutidos os resultados obtidos no estudo experimental, desenvolvido no contexto do projeto “Durable-FRP”, que teve como objetivo investigar os efeitos do envelhecimento higrotérmico na durabilidade e desempenho de dois compósitos de GFRP produzidos com duas resinas distintas, poliéster insaturado (UP) e viniléster (VE), ambos tendo a mesma arquitetura e conteúdo de fibras. O efeito da degradação no desempenho de ambos os GFRP foi estudado com base em ensaios experimentais que permitiram averiguar a retenção das suas propriedades termomecânicas e mecânicas. Com este estudo, pretendeu-se avaliar e definir como é que os compósitos de GFRP se degradam quando são sujeitos àquele ambiente de envelhecimento, permitindo assim entender melhor e estimar a sua resistência a longo prazo, quando utilizado em diferentes aplicações da engenharia civil.

Este capítulo é essencialmente composto por uma secção principal, na qual são apresentados e discutidos os resultados obtidos. Esta secção encontra-se dividida em três partes principais: uma primeira, referente às diferentes propriedades termomecânicas e mecânicas do material num estado virgem; uma segunda, onde se analisa a degradação das propriedades termomecânicas; e, por fim, uma terceira, onde são avaliadas as propriedades associadas aos diferentes ensaios mecânicos, de tração, compressão, flexão, corte no plano e corte interlaminar. No final do capítulo, são apresentadas algumas considerações finais.

4.2. Caracterização de referência - provetes sem envelhecimento (*unaged*)

Na presente secção, apresentam-se os resultados experimentais da caracterização termomecânica e mecânica de ambos os compósitos de GFRP antes do envelhecimento. Estes resultados são particularmente relevantes, uma vez que serão a referência utilizada para comparação com os resultados obtidos para os diferentes ambientes de envelhecimento.

Na Figura 21, são apresentadas as curvas representativas dos resultados de DMA para os dois GFRP em estudo (UP - traçado a azul; VE - traçado a vermelho), na qual, o eixo da esquerda corresponde ao módulo de armazenamento, E' , representado por linha contínua, e o eixo da direita corresponde ao fator de perda, $\tan \delta$, definido por linha a tracejado, ambos em função da temperatura. A Tabela 1, apresentada mais à frente, inclui uma síntese dos resultados deste ensaio.

O gráfico da Figura 21 mostra que as curvas associadas ao módulo E' apresentam forma sigmoidal, típica deste tipo de polímeros reforçados com fibras. A partir desta curva, é possível definir uma estimativa da temperatura de transição vítreia com base no início do decaimento do módulo de armazenamento (“*onset of storage modulus decay*”); em termos mecânicos, essa temperatura corresponde ao início de uma redução acentuada na rigidez à flexão do material. Esta estimativa é obtida graficamente pela interseção das tangentes ao primeiro patamar e ao segmento de reta de declive negativo máximo). Em termos comparativos, os provetes constituídos pela resina de VE demonstraram maiores valores iniciais para o módulo de armazenamento (o que pode ter a ver com a

geometria/espessura dos provetes e ligeiras diferenças na quantidade e posição das fibras, dado que foi realizada uma redução de espessura para a execução destes ensaios), um declive mais acentuado na transição entre ambos os patamares e, mais relevante, um valor mais elevado da T_g "onset", por comparação com o GFRP constituído pela resina de UP (94,9 °C vs. 86,0 °C).

Quanto às curvas associadas à $\tan \delta$ (Figura 21), no caso da resina de VE, esta exibiu um pico superior ao apresentado pela resina de UP; no entanto, a T_g associada a ambos os picos foi aproximadamente de igual valor (111,4 °C vs. 111,5 °C nas resinas de VE e UP, respectivamente). Para ambas as resinas, os valores de T_g estimados através da $\tan \delta$ são superiores aos obtidos através do módulo de armazenamento E' "on set", o que é normal nestes materiais.

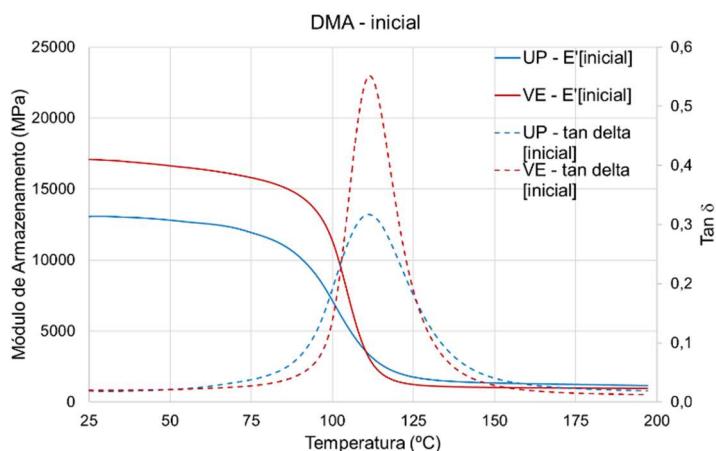


Figura 21 – Curvas representativas do ensaio de DMA para os provetes de UP e VE sem envelhecimento.

Do ponto de vista mecânico e para melhor averiguar as diferentes propriedades dos dois GFRP em estudo, reproduziram-se sob a forma de gráficos (Figura 22) as seguintes curvas representativas obtidas nos diferentes testes mecânicos: (a) tensão axial à tração (σ_t) vs. extensão axial à tração (ϵ_t); (b) tensão axial à compressão (σ_c) vs. deformação axial à compressão (ϵ_t); tensão de corte (τ) vs. distorção (γ); (d) tensão de corte interlaminar (σ_{sbs}) vs. deslocamento a meio vão (s); (e) tensão de flexão (σ_f) vs. deslocamento a meio vão (s). A Tabela 1, apresentada adiante, inclui um sumário dos resultados destes ensaios.

Os resultados ilustrados na Figura 22 mostram que, como era esperado, de um modo geral, o comportamento mecânico de ambos os GFRP (resina UP e VE) foi linear até à rotura. A única exceção foi o comportamento ao corte no plano (IP), mais dependente da matriz polimérica, em que ambos os materiais apresentaram uma progressiva redução da rigidez (comportamento não-linear), após uma resposta linear numa fase inicial.

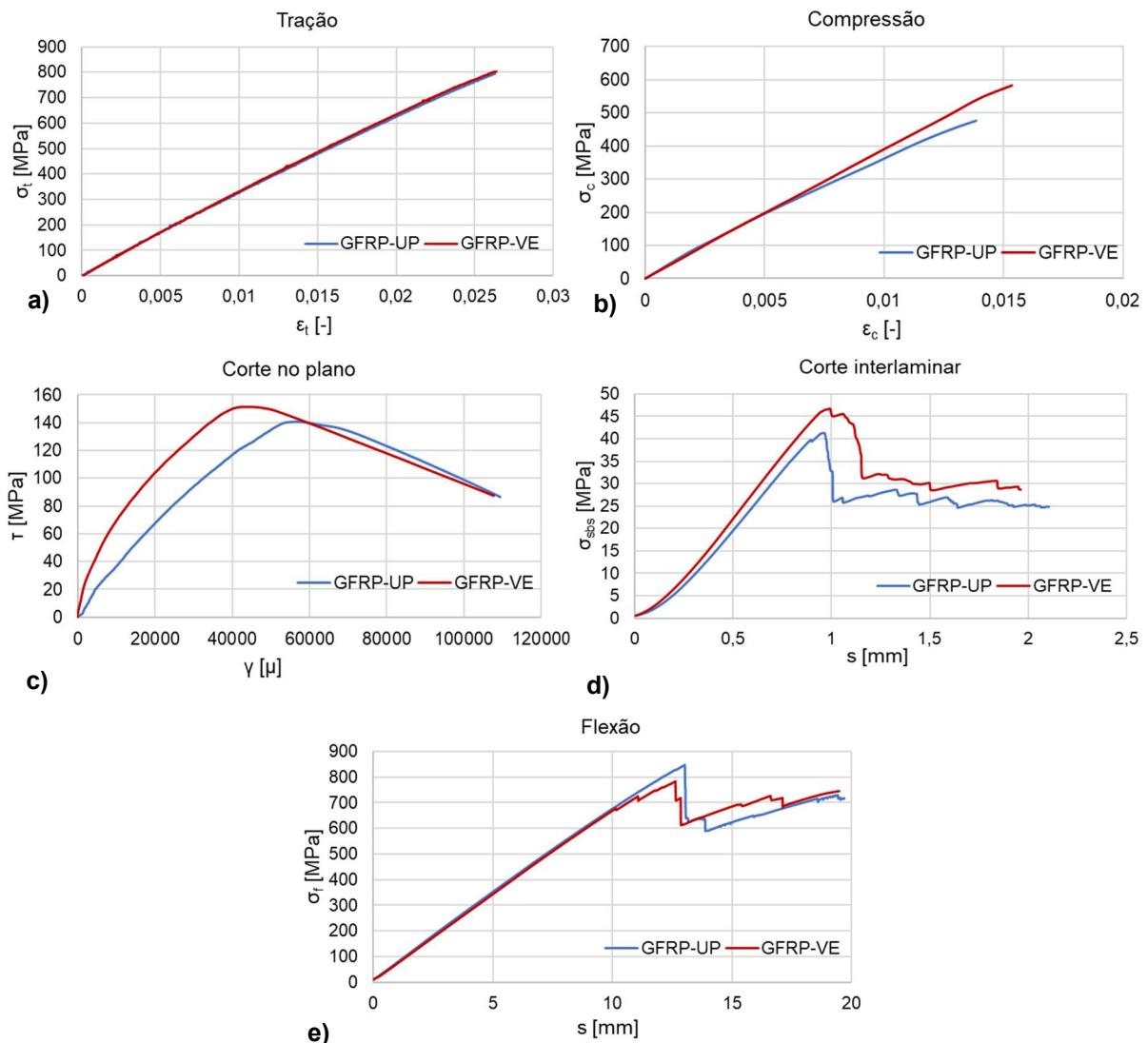


Figura 22 – Curvas representativas do comportamento mecânico para os diferentes ensaios: (a) tração; (b) compressão; (c) corte no plano; (d) corte interlaminar; (e) flexão.

De um modo geral, os provetes apresentaram propriedades elásticas (rigidez) semelhantes. No entanto, para o ensaio ao corte no plano, os provetes de VE exibiram uma rigidez superior à dos provetes de UP. Relativamente às resistências, em tração, os dois GFRP apresentaram valores últimos semelhantes, ligeiramente (4%) superiores para o perfil VE. Quanto aos valores de resistência registados nos ensaios de compressão, corte no plano e corte interlaminar, verificou-se que os provetes de GFRP com resina VE têm melhor desempenho, apresentando valores superiores (entre 5% e 18%) aos da resina de UP. No entanto, o GFRP com resina UP apresentou desempenho ligeiramente (7%) superior em termos de resistência à flexão por comparação com o GFRP com resina VE.

Os valores das diferentes propriedades mecânicas e termomecânicas obtidas para cada um dos GFRP são indicadas na Tabela 10, que mostra os valores médios e os respetivos coeficientes de variação (CoV, em %).

Tabela 10 – Propriedades termomecânicas e mecânicas dos perfis de GFRP sem envelhecimento.

Ensaio	Propriedade	GFRP - UP	CoV (UP)	GFRP - VE	CoV (VE)
DMA	T_g "onset" [°C]	$86,0 \pm 0,8$	1%	$94,9 \pm 0,2$	0%
Tração	σ_{tu} [MPa]	767 ± 32	4%	795 ± 13	2%
	E_{tu} [GPa]	$34,1 \pm 0,4$	1%	$34,0 \pm 0,4$	1%
	ε_{tu} [-]	$0,0257 \pm 0,0012$	5%	$0,0261 \pm 0,0006$	2%
Compressão	σ_{cu} [MPa]	469 ± 34	7%	556 ± 44	8%
	E_{cu} [GPa]	$36,8 \pm 2,7$	7%	$39,2 \pm 2,0$	5%
	ε_{cu} [-]	$0,0137 \pm 0,0008$	6%	$0,0177 \pm 0,0030$	17%
Flexão	σ_{fu} [MPa]	831 ± 42	5%	780 ± 83	11%
Corte no plano	T_{max} [MPa]	143 ± 4	3%	151 ± 3	2%
	G [GPa]	$3,19 \pm 0,28$	9%	$3,85 \pm 0,21$	5%
Corte interlaminar	σ_{sbs} [MPa]	$41,6 \pm 1,6$	4%	$46,7 \pm 1,3$	3%

Na Figura 23 são apresentados os diferentes modos de rotura observados nos testes mecânicos, os quais estão de acordo com o esperado, e foram semelhantes para ambos os tipos de GFRP, não tendo também sido afetados pelos diferentes tipos de envelhecimento. Estes modos de rotura são descritos e analisados em detalhe nos parágrafos seguintes.

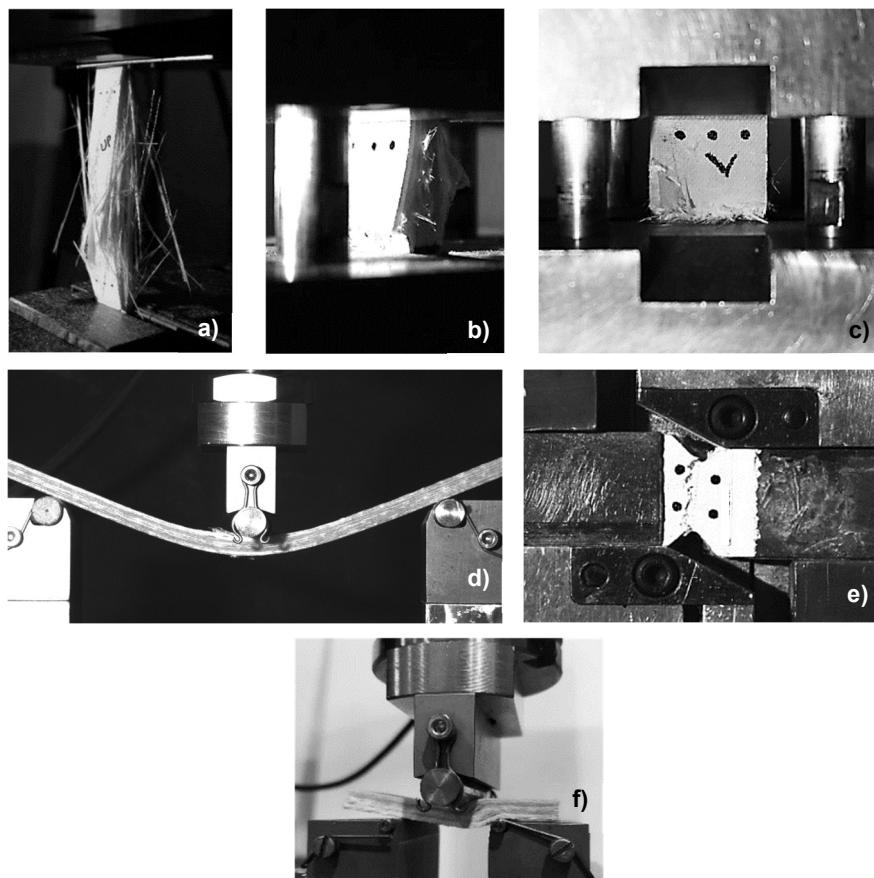


Figura 23 – Modos de rotura observados nos diferentes ensaios mecânicos: (a) tração; (b) e (c) compressão; (d) flexão; (e) corte no plano; (f) corte interlaminar.

Começando pelo modo de rotura à tração, esta iniciou-se com a rotura das fibras unidirecionais (L600) localizadas no centro do laminado, tendo-se seguido a rotura progressiva das camadas exteriores de CSM, que se desenvolveu posteriormente para as fibras com orientação quadriaxial (Q850). Por vezes, a rotura das fibras unidirecionais ocorreu em simultâneo com a das camadas exteriores de CSM. Apesar de esta sequência ter sido comum para ambos os GFRP, no caso do material com resina UP, a rotura apresentou-se como mais explosiva, libertando maiores concentrações de fibra e resina (sob a forma de partículas).

A rotura por compressão foi súbita, dando-se por esmagamento na zona central livre. No local da rotura, foi também visível delaminação e rotura do reforço fibroso existente nesse local.

A rotura à flexão iniciou-se nas camadas situadas na parte superior do provete, sujeitas às maiores tensões de compressão, levando à rotura das fibras na direção longitudinal. Seguidamente, verificou-se delaminação das camadas interiores do laminado, a que se seguiu a rotura das camadas inferiores, sujeitas às maiores tensões de tração (esta última fase foi observada apenas nalguns provetes, com maior incidência na resina de VE e nos ambientes mais agressivos – W40 e W60).

A rotura originada por tensões de corte no plano caracterizou-se por uma fratura vertical entre as extremidades dos entalhes, atravessando fibras e matriz ao longo da direção transversal do provete.

Por fim, no ensaio de corte interlaminar, verificou-se rotura da matriz na zona central do provete, com consequente delaminação interlaminar em direção a um dos apoios.

4.3. Efeito do envelhecimento na resposta termomecânica

A Figura 24 apresenta as curvas representativas dos ensaios DMA efetuados. Como referido, o eixo da esquerda corresponde ao módulo de armazenamento (E') em função da temperatura (linhas a cheio); o eixo da direita corresponde ao fator de perda ($\tan \delta$), também este em função da temperatura (linhas a tracejado). As curvas representam o comportamento de provetes num estado pré- e pós-envelhecimento causado pelos diferentes ambientes, para os períodos temporais avaliados.

Os gráficos ilustrados na Figura 24 mostram que, independentemente do período de imersão ou temperatura, as curvas do módulo de armazenamento E' apresentam sempre forma sigmoidal, característica deste tipo de materiais, com uma queda abrupa do valor de E' na região da temperatura de transição vítreo. Desta forma, após um patamar inicial em que o material se apresenta num estado físico vítreo, o módulo E' diminui significativamente (com maior declive para o VE e com um declive mais suave para UP), verificando-se, após o início de um novo patamar, valores de E' com uma ordem de grandeza de, aproximadamente, 10% dos valores iniciais. A forma destas curvas é um reflexo das principais mudanças ocorridas na matriz polimérica, em termos da sua viscoelasticidade (estado vítreo para estado elastomérico). As fibras não têm influência no andamento destas curvas, uma vez que o intervalo de temperaturas associado a este ensaio não é suficientemente elevado para afetar a sua rigidez [33]. Em termos qualitativos, a forma destas curvas não se alterou de forma significativa para os vários períodos de imersão e ambientes de envelhecimento, sendo que o declive da fase de transição vítreo pouco se alterou dentro de cada ambiente. No entanto, para cada tipo de ambiente, ocorreu uma diminuição do valor inicial do módulo E' em função do tempo de imersão. Verificou-se

apenas uma exceção a esta tendência: os provetes testados em estado seco após 3 meses de imersão em água a 20 °C; neste caso, foi visível uma recuperação, devido ao processo de secagem, tendo mesmo ocorrido uma reversão da degradação observada em estado húmido, que se concluiu assim ser de caráter físico (plasticização), tendo o GFRP readquirido um módulo semelhante (ou mesmo superior, para UP) ao do material sem envelhecimento.

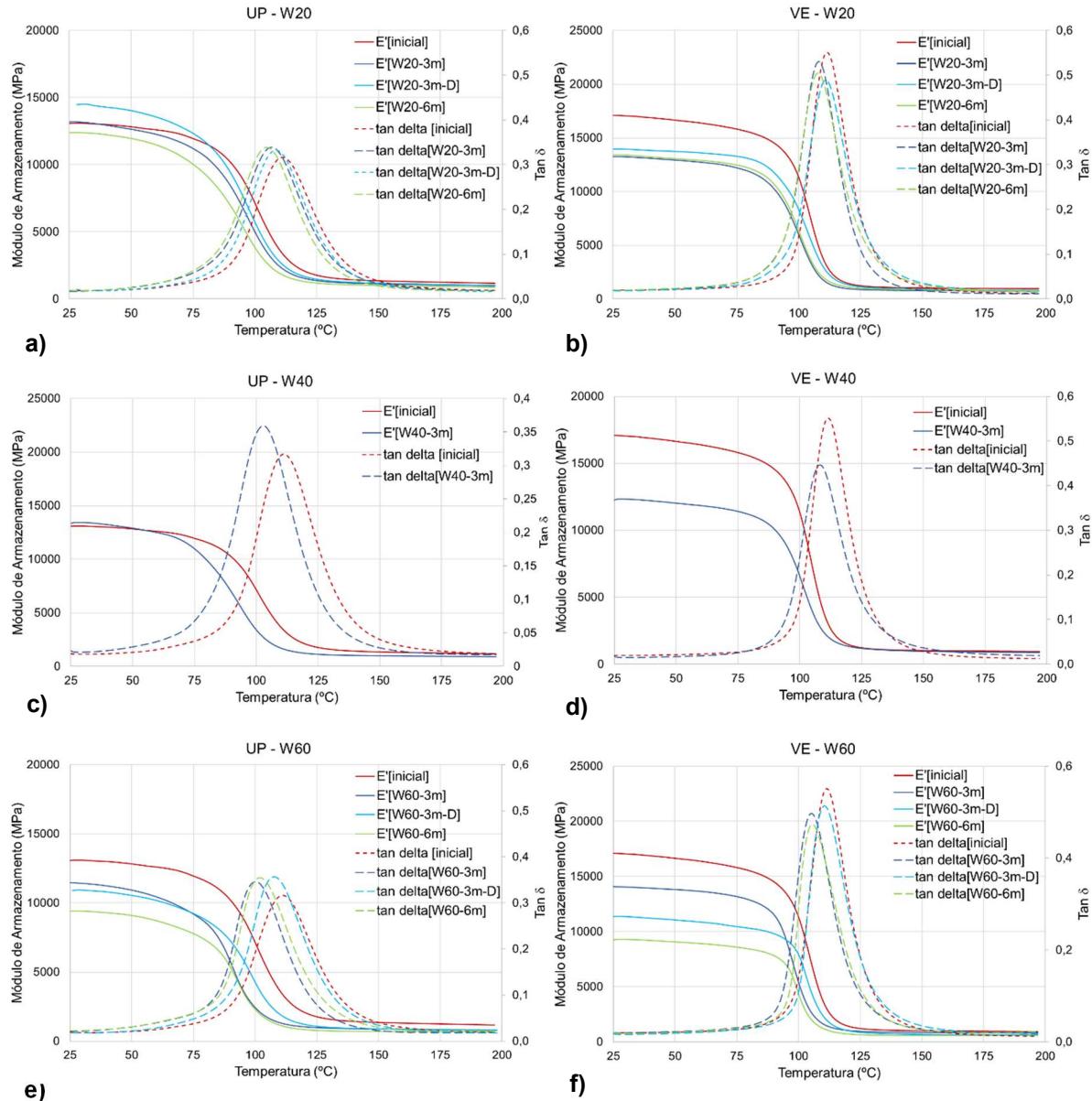


Figura 24 – Curvas DMA para imersão em água a diferentes temperaturas e períodos: a 20 °C para perfis (a) UP e (b) VE; a 40 °C para perfis (c) UP e (d) VE; a 60 °C para perfis (e) UP e (f) VE.

Considerando as curvas representativas do fator de perda ($\tan \delta$) (Figura 24), estas, tal como esperado, apresentaram um máximo na região associada à fase de transição vítreo, característica típica deste tipo de materiais. No caso do compósito com resina UP, com o aumento do tempo de imersão, as curvas de $\tan \delta$ sofreram um deslocamento para a esquerda, ocorrendo também, na maioria dos casos, um aumento do máximo valor de fator de perda. Este deslocamento da curva sugere um aumento da viscosidade do material associado ao aumento do rácio $E''/E' = \tan \delta$ (também denominado fator de amortecimento). Já para o compósito com resina VE, a curva apresentou a mesma tendência de deslocamento, mas o ponto máximo diminuiu com o aumento do tempo de imersão, indicando uma resposta mais rígida/elástica do material, logo com menor capacidade de amortecimento.

Em termos de retenção de desempenho, na presente dissertação, foi apenas averiguada a retenção da T_g “onset” associada ao dois GFRP em estudo, por ser o parâmetro geralmente mais relevante para análises termomecânicas no contexto de aplicações estruturais da engenharia civil. Assim, a Figura 25 apresenta as alterações (face ao valor inicial) na estimativa da T_g “onset” (valor médio (%)) com barras de erro associadas ao CoV (%) para os diferentes ambientes de envelhecimento e períodos de imersão, obtidas diretamente através do início do decaimento da curva do módulo de armazenamento E' .

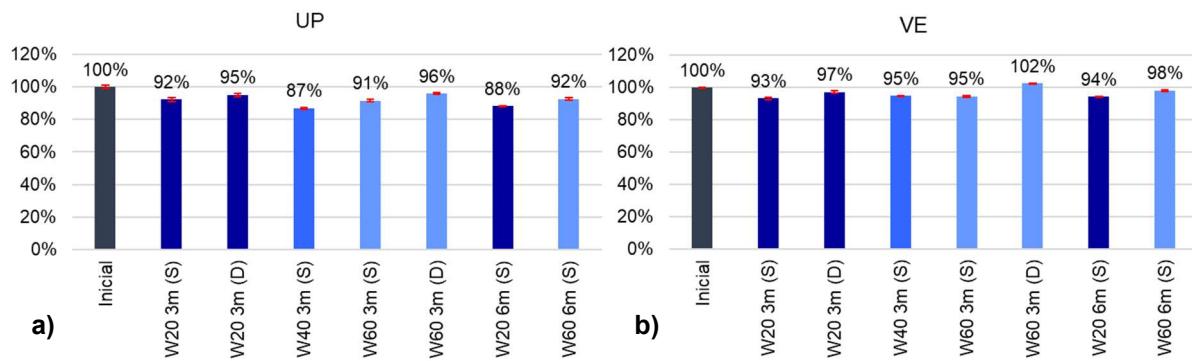


Figura 25 – Variação da temperatura de transição vítreo, T_g “onset”, para os diferentes ambientes de envelhecimento e perfis: (a) UP; (b) VE.

Os gráficos ilustrados na Figura 25 mostram que a degradação da T_g “onset” de ambos os tipos de compósitos foi pouco significativa, tendo em geral sido superior no compósito com resina UP, em que a redução máxima foi de 13% no ambiente W40 3m (S). Já no compósito com resina de VE, a redução máxima foi de 7% no ambiente W20 3m (S). Desta maneira, é possível afirmar que a resina de VE parece ter sido menos suscetível à degradação por imersão em água, principalmente por hidrólise, e mais resistente aos mecanismos de plasticização e menos dependente da temperatura.

Comparando os resultados obtidos entre os estados saturado e seco, este último apresenta sempre maior capacidade de retenção da T_g “onset”, mas que esta retenção não é geralmente total; este resultado confirma que a degradação apresentada no estado saturado resulta não só de alterações de carácter físico, isto é, associadas a reações reversíveis, mas também de alterações de carácter químico, que serão irreversíveis. Com o aumento do tempo de exposição, a capacidade de retenção parece tender a estabilizar num patamar, devendo esta evolução ser confirmada nos ensaios futuros no âmbito do projeto “Durable-FRP”; relativamente à temperatura, não parece existir uma relação clara com a degradação da T_g “onset”.

A reduzida vulnerabilidade desta propriedade aos ambientes de envelhecimento em estudo pode ser explicada pelo facto de o material poder não se encontrar totalmente curado (não obstante o procedimento de pós-cura a que foi sujeito). Assim, a degradação apresentada resultará da competição entre processos de degradação com o efeito originado por fenómenos de pós-cura [80]. Exemplo disso, é o facto de no ambiente “W60 3m (D)” o compósito de VE apresentar 102% de retenção, o que parece mostrar que a temperatura mais elevada contribuiu para efeitos de pós-cura, atenuando e compensando a degradação que aí se verificaría. Também aqui os ensaios a realizar no futuro, para períodos mais prolongados, fornecerão informação adicional.

As conclusões retiradas do presente estudo são semelhantes às determinadas por Cabral-Fonseca *et al.* [33] e Sousa *et al.* [13], que efetuaram ensaios de DMA em materiais compósitos pultrudidos comparáveis, com resinas de UP e VE, e analisaram a variação das curvas de E' e $\tan \delta$ e avaliaram as percentagens de retenção da T_g . No estudo de Cabral-Fonseca *et al.* [33] o material foi testado após remoção das câmaras de imersão, enquanto no estudo de Sousa *et al.* [13] o material foi previamente sujeito a um processo de secagem. Para a curva E' , em ambos os estudos verificou-se uma diminuição inicial nos valores daquela grandeza, de menor magnitude no compósito de UP face ao de VE. No entanto, Sousa *et al.* [13] reportaram que algumas das curvas do módulo E' apresentavam dois pontos de inflexão, refletidos numa diminuição, seguida de aumento, do valor do módulo E' . Os autores explicaram que esta variação poderia estar relacionada com moléculas de água retidas no interior dos provetes (por secagem incompleta), gradualmente contribuindo para a ocorrência de plasticização. A curva associada à $\tan \delta$ mostrou resultados diferentes dos obtidos no presente estudo, especialmente para o perfil UP, tendo a curva da $\tan \delta$ apresentado uma translação para a direita, com elevada dependência da temperatura, refletindo um aumento da T_g associado ao envelhecimento. Assim, relativamente aos valores de retenção, não obstante a magnitude dos valores reportados por Sousa *et al.* [13] ter sido semelhante à do presente estudo, aqueles autores registaram aumentos da T_g para o perfil UP, o que não se verificou na presente campanha. Já Cabral-Fonseca *et al.* [33] registaram tendências de degradação semelhantes, mas com magnitudes maiores, possivelmente justificável pela espessura dos seus provetes ser menor (ou seja, a saturação poderá ter ocorrido mais cedo) e pelo facto de metade dos provetes testados na presente dissertação terem sido submetidos a um processo de secagem, que terá atenuado alguns mecanismos de degradação, amplificando os efeitos de pós-cura e anulando a parcela reversível da degradação.

4.4. Efeito do envelhecimento na resposta mecânica

4.4.1. Comportamento à tração

Como referido, o modo de rotura em tração foi o mesmo ao longo dos diferentes períodos de envelhecimento. No entanto, o envelhecimento em condições higrotérmicas afetou a resistência à tração e o respetivo módulo. A Figura 26 apresenta as curvas representativas de tensão vs. deformação para ambos os GFRP em estudo quando sujeitos a um dos ambientes de envelhecimento (W60 - ambiente mais agressivo), como exemplo do efeito da degradação em ambas as propriedades. No Anexo A e B são apresentadas as curvas para os restantes ambientes.

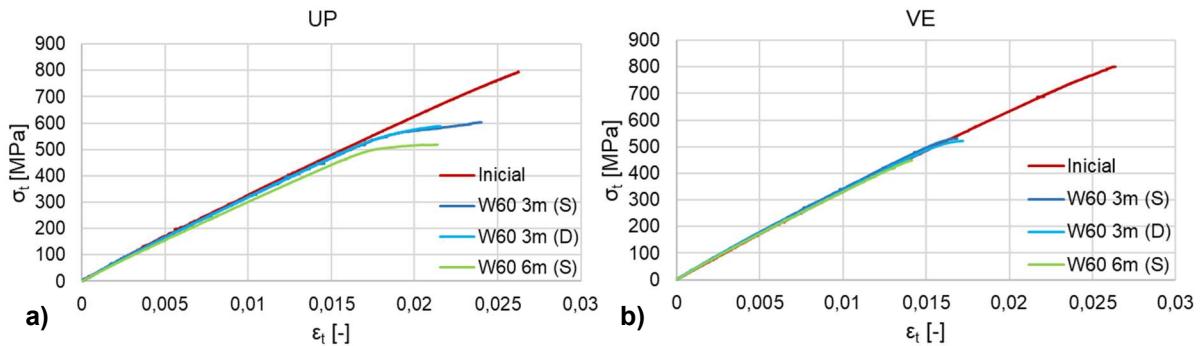


Figura 26 – Curvas de tensão vs. deformação do ensaio tração, para diferentes períodos de envelhecimento em imersão em água a 60 °C: perfil (a) UP e (b) VE.

As curvas apresentadas mostram que, em ambos os compósitos, a resistência à tração foi consideravelmente mais afetada do que o módulo de elasticidade à tração. A degradação da resistência aumentou com o período de imersão, tendo sido pouco relevante a recuperação desta propriedade para o material no estado seco. O facto de a degradação da resistência ter sido maior do que a do módulo de elasticidade é consistente com a contribuição relativa das fibras e da matriz para ambas as propriedades. De facto, enquanto o módulo de elasticidade depende essencialmente das fibras (que terão sido menos afetadas pela humidade), a resistência depende não só das fibras, mas também da matriz e da interface fibra-matriz (que terão sido mais afetadas pela humidade).

Na Figura 27, são quantificados os efeitos que o envelhecimento higrotérmico teve na resistência à tração dos dois compósitos, para todos os ambientes de envelhecimento e períodos de imersão.

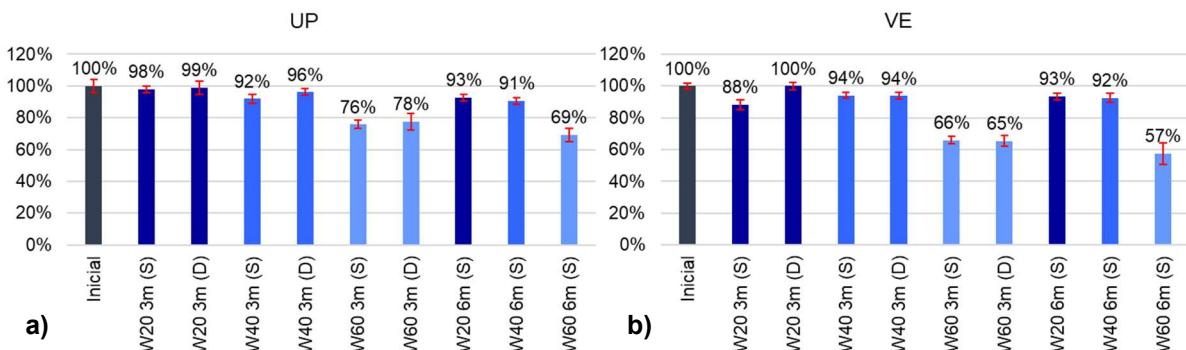


Figura 27 – Variação da resistência à tração, para os diferentes ambientes de envelhecimento e perfis: (a) UP e (b) VE.

É notório que, para ambos os GFRP, o envelhecimento higrotérmico diminuiu a retenção da resistência à tração, sendo evidente uma progressiva redução em função da temperatura e tempo de imersão. Nos parágrafos seguintes, apresenta-se uma análise mais detalhada dos dados obtidos, por resina e por períodos temporais.

Ao longo do período de envelhecimento considerado na presente dissertação, a redução da resistência dos provetes de UP acentuou-se com a temperatura de imersão. Para o estado seco, verificou-se pouca reversão das propriedades (entre 1% e 3%). Nos ambientes W20 e W40, registaram-se valores elevados de retenção, o que mostra que a resistência à tração foi pouco afetada por estes ambientes. Tal pode ser justificado pelo facto de o reforço fibroso ter uma contribuição relevante para a resistência

à tração, o qual não é muito afetado por nenhum mecanismo de degradação, dado o relativamente curto período de imersão nestas temperaturas mais reduzidas. No entanto, para o ambiente W60 a redução de resistência foi maior - aproximadamente 24% e 22%, respetivamente em estado saturado e seco, o que pode ser justificado pelos mecanismos de degradação ao nível da matriz, que deve promover uma distribuição uniforme de tensões entre as fibras (interface). A reduzida recuperação da resistência do estado saturado para o estado seco mostra que a maior parte da degradação foi irreversível, estando presumivelmente associada a fenómenos de hidrólise e perda de aderência na interface fibra-matriz.

Para uma imersão de 6 meses nos ambientes de envelhecimento em estudo, manteve-se a tendência decrescente da retenção da resistência; no entanto, entre os 3 e os 6 meses, a taxa de diminuição foi menor, sendo previsível que seja atingido um patamar de estabilização para os próximos períodos de envelhecimento. Novamente, foi para o ambiente W60 que se notou uma maior diminuição da resistência do material (31%) no estado saturado (ainda não estão disponíveis os resultados no estado seco), mostrando que a temperatura elevada continua a promover a ocorrência de mecanismos de degradação irreversíveis, nomeadamente a hidrólise.

Em relação aos provetes de VE, a degradação da resistência foi mais severa para a menor temperatura (W20) e para períodos de imersão de apenas 3 meses (12% de redução); no entanto, nas mesmas condições, após secagem, verificou-se uma total recuperação da resistência, o que mostra que aquela degradação foi essencialmente de carácter reversível. A degradação para W40 foi menos severa do que a ocorrida para W20, o que se pode dever ao facto de a imersão a 40 °C ter permitido a ocorrência de alguma pós-cura, sendo que este mecanismo terá competido com os mecanismos de degradação. A imersão a 60 °C, tal como para os provetes de UP, foi o ambiente que causou maior degradação na resistência à tração, estando quase totalmente associada a reações irreversíveis, por não se ter verificado praticamente qualquer recuperação da mesma após secagem. Novamente, a degradação aumentou com o tempo de imersão e a evolução da resistência aparenta ter tendência a estabilizar num patamar para os períodos temporais seguintes. De um modo geral, por comparação com os provetes de UP, a resistência à tração dos provetes de VE foi significativamente mais afetada para imersão a 60 °C.

Os resultados obtidos no presente estudo apresentam diferenças significativas face aos reportados por Cabral *et al.* [33] e Sousa *et al.* [13] – nos estudos destes autores, os materiais GFRP, produzidos por pultrusão e constituídos por resina de VE, por comparação com materiais equivalentes com resina UP, apresentaram uma maior retenção de resistência à tração em ambiente higrotérmico, situação que não se verificou na presente campanha, onde os GFRP de resina de VE, apresentam sempre uma retenção inferior à outra resina. Esta diferença pode advir da composição química das resinas, podendo porventura ser quimicamente mais resistente a que aqueles autores utilizaram e, também, o facto de o processo de pultrusão permitir obter valores mais elevados de T_g o que melhora a estabilidade hidrolítica das resinas. No entanto, em termos qualitativos, as tendências de degradação obtidas neste estudo são comparáveis às reportadas naqueles estudos, verificando-se maior degradação para temperaturas de imersão superiores. Naqueles estudos, para alguns períodos de envelhecimento, identificou-se uma melhoria de desempenho associada a alguns fenómenos de pós-cura e a

degradação de maior magnitude ocorreu sempre para a temperatura mais elevada (W60), a qual se sobrepôs aos efeitos de pós-cura.

Na Figura 28 apresenta-se a variação do módulo de elasticidade à tração dos dois materiais quando submetidos a envelhecimento higrotérmico, também importante para a caracterização da durabilidade.

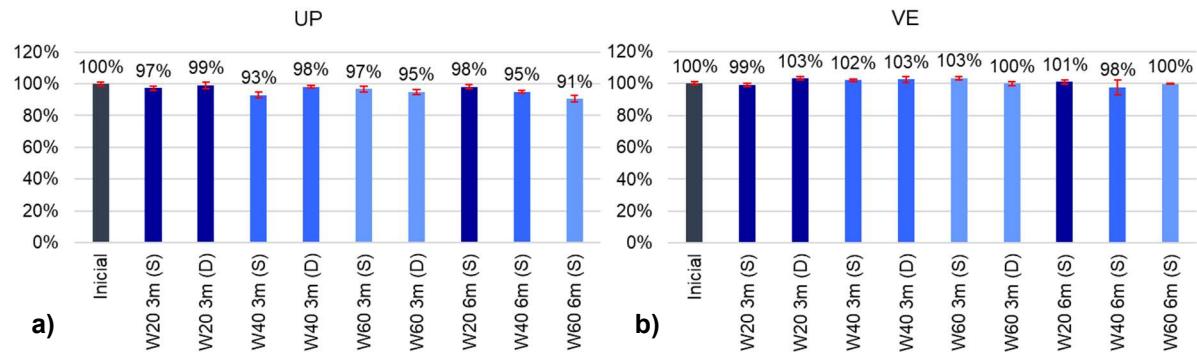


Figura 28 – Variação do módulo à tração, para os diferentes ambientes de envelhecimento e perfis: (a) UP e (b) VE.

O módulo à tração dos provetes UP foi muito pouco afetado, com ligeiras reduções na generalidade dos ambientes, em particular por comparação com a degradação da resistência à tração – a maior redução verificou-se no ambiente W60 (9%). Tal como para a resistência são geralmente visíveis sinais de recuperação do módulo à tração após secagem (exceto para W60 3m). Novamente, é notória a tendência de maior degradação para períodos de imersão mais longos, no entanto, com uma muito menor magnitude do que no caso da resistência à tração.

O módulo à tração dos provetes de VE foi também muito pouco afetado pelos ambientes em questão, mesmo para os períodos de imersão mais longos; de facto, na maioria dos casos, ocorreu recuperação total e, até mesmo, aumento desta propriedade (até 3%). Desta maneira, não foi possível verificar qualquer dependência da temperatura para a degradação (ou variação) desta propriedade, uma vez que a taxa de retenção foi muito semelhante para provetes envelhecidos a diferentes temperaturas e, também, sujeitos aos diferentes períodos de imersão.

Os resultados obtidos são consistentes com os reportados por Cabral-Fonseca *et al.* [33] - estes autores também concluíram que, para o módulo à tração, é mais complexo definir uma correlação entre a sua variação e o ambiente e período de imersão. Por outro lado, tal como no estudo de Sousa *et al.* [13], os níveis de degradação obtidos no presente estudo foram, de uma maneira geral, reduzidos e o desempenho exibido pelos provetes de VE foi superior ao dos provetes de UP.

4.4.2. Comportamento à compressão

O modo de rotura foi o mesmo ao longo dos diferentes períodos de envelhecimento, no entanto, o envelhecimento em condições higrotérmicas afetou as diferentes propriedades mecânicas em compressão. A Figura 29 apresenta as curvas representativas de tensão vs. deformação para ambos os GFRP em estudo, sujeitos ao ambiente de envelhecimento W60, o mais agressivo.

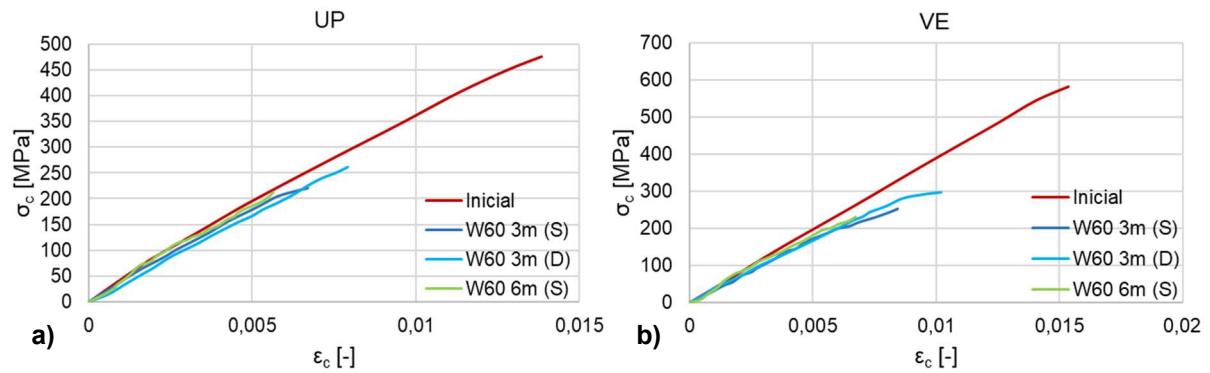


Figura 29 – Curvas de tensão vs. deformação do ensaio à compressão, para diferentes períodos de envelhecimento em imersão em água a 60 °C: perfil (a) UP e (b) VE.

Em termos gerais, os gráficos da Figura 29 mostram uma notória redução da resistência à compressão com o aumento do período de exposição, no entanto, tal como no ensaio de tração, a rigidez apresentou uma variação muito menos acentuada.

A Figura 30 ilustra a retenção de resistência à compressão de ambos os materiais, para os diferentes ambientes de envelhecimento e períodos de imersão.

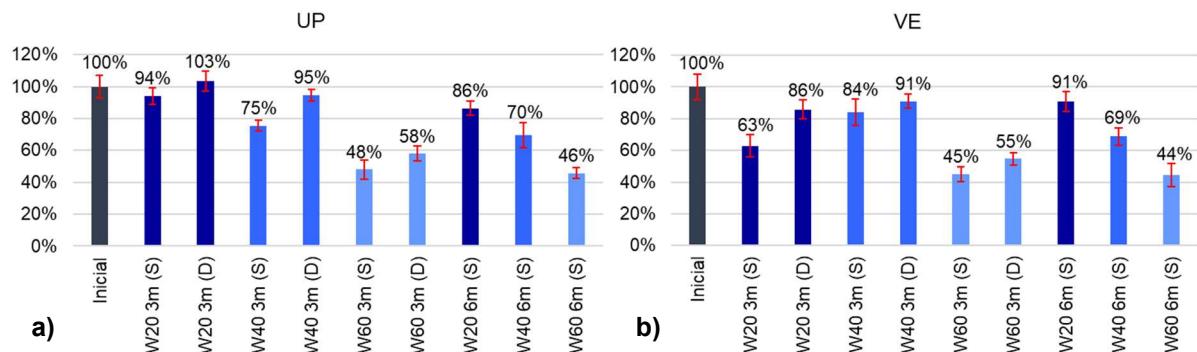


Figura 30 – Variação da resistência à compressão, para os diferentes ambientes de envelhecimento e perfis: (a) UP e (b) VE.

De uma maneira geral, e como esperado, o aumento da temperatura e do tempo de imersão afetaram negativamente a resistência à compressão de ambos os compósitos GFRP. No caso da resina UP, após 3 meses de imersão, a degradação foi muito reduzida (6%) no ambiente W20, tendo-se registado uma recuperação total e até aumento (3%) desta propriedade em estado seco. Esta situação pode ser explicada por uma possível pós-cura neste ambiente, assim como por uma maior relevância da plasticização nesta propriedade. Para o ambiente W40, a degradação em estado saturado já foi mais elevada (cerca de 25%), devendo-se em grande parte a reações físicas reversíveis, associadas à plasticização, já que em estado seco a redução foi muito menos significativa (5%). O ambiente W60, o mais agressivo, provocou uma degradação muito significativa da resistência (52%) e, mesmo em estado seco, a redução de resistência foi elevada (42%), o que pode apontar para uma maior ocorrência de reações de carácter irreversível (hidrólise). Após 6 meses de imersão no ambiente W60, a resistência parece estar a tender para um patamar.

Em relação ao compósito com resina de VE, a degradação após 3 meses de imersão no ambiente W20 foi relativamente elevada (37%). A magnitude desta diminuição de resistência, de certa forma inesperada (até por comparação com o ambiente W40), pode ser explicada pela seguinte hipótese: a resistência à compressão dos provetes depende, em grande medida, das propriedades da matriz polimérica, que evita a encurvadura das fibras comprimidas. A resina associada a este GFRP é constituída por diversos componentes, alguns dos quais hidrofílicos (grupos éster); um grau de cura insuficiente (a quando do ensaio) nesta placa em particular (sujeita ao ambiente W20), poderá ter favorecido a entrada de moléculas de água para o interior do polímero e, assim, o provete terá sofrido maior degradação da sua resistência à compressão. Apesar de não serem claros os motivos para um eventual grau de cura inferior desta placa em particular, esta hipótese será aferida no âmbito do projeto "Durable-FRP" através da repetição deste ensaio numa nova placa. No entanto, verifica-se que parte significativa desta degradação teve carácter reversível, tendo-se verificado uma recuperação significativa nos provetes em estado seco, como é visível para W20 3m (D), o que é consistente com um ingresso de água particularmente elevado nesta placa. Para o ambiente W40, a degradação foi menos significativa do que no ambiente W20, porventura porque esta placa tenha sido melhor curada (imersão em 40 °C também contribui para tal, com a promoção de pós-cura pelo efeito da temperatura elevada), o que originou uma menor introdução de água e, consequentemente, uma menor degradação da resistência à compressão. Novamente, uma parte considerável da degradação aí verificada foi de carácter físico e reversível, pois ocorreu uma considerável recuperação desta propriedade para os provetes no estado seco. Para o ambiente W60, os efeitos da degradação causados pela temperatura elevada superaram os efeitos de pós-cura, sendo a degradação aqui observada a mais elevada (55%) e com maior carácter irreversível por hidrólise dos componentes da matriz.

Para ambos os polímeros, uma exposição mais prolongada a um dado ambiente, promoveu uma maior degradação da resistência à compressão. No entanto, e tal como para o ensaio de tração, a taxa da degradação aparenta estar a diminuir, sendo expectável que seja atingido um patamar de estabilização nos próximos períodos de envelhecimento.

A variação do módulo de elasticidade à compressão de ambos os materiais, consoante o ambiente de exposição e período de imersão, é apresentada na Figura 31.

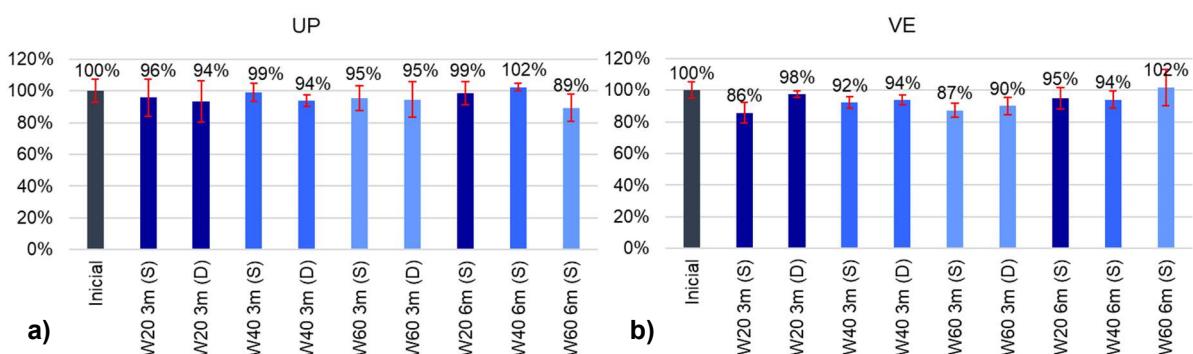


Figura 31 – Variação do módulo de elasticidade à compressão, para os diferentes ambientes de envelhecimento e perfis: (a) UP e (b) VE.

Os gráficos ilustrados na Figura 31 permitem tirar conclusões muito semelhantes às do ensaio de tração; de facto, novamente, por comparação com as taxas de retenção da resistência (agora em compressão), os valores obtidos de degradação do módulo de elasticidade são bastante inferiores.

Quanto ao módulo de elasticidade à compressão dos provetes de UP, é notório que existe uma variação reduzida da taxa de retenção entre os diferentes períodos de imersão e temperatura (redução máxima de 11% para o ambiente W60, após 6 meses). Por outro lado, ao contrário de outras propriedades já analisadas, não são evidentes sinais de recuperação desta propriedade para o estado seco.

No caso dos provetes de VE, o módulo de elasticidade à compressão apresentou maiores percentagens de degradação, por comparação com os provetes de UP; no entanto, novamente, as variações são de magnitude relativamente reduzida (redução máxima de 14% no ambiente W20, após 3 meses), sobretudo por comparação com a registada para a resistência. Neste caso, e como geralmente ocorre, verificou-se uma recuperação (ligeira a moderada) da retenção para os provetes no estado seco. Para os ambientes W20 e W60, a degradação do módulo de elasticidade à compressão foi semelhante, tendo sido menos gravosa para o ambiente W40. Esta situação pode ser explicada da seguinte forma: para o ambiente W20, cujos provetes foram extraídos da mesma placa com grau de cura presumivelmente baixo (como discutido para a resistência à compressão), a entrada de água no interior do provete terá ocorrido a uma taxa particularmente elevada, promovendo a sua degradação; no ambiente W40, a temperatura elevada terá promovido a pós-cura, melhorando as características do material, e não foi suficientemente elevada para produzir uma degradação muito significativa; já no ambiente W60, a competição entre estes dois mecanismos é mais evidente, com uma degradação maior do módulo após 3 meses (a degradação terá superado os efeitos da pós-cura), seguida de uma recuperação do módulo após 6 meses, com um aumento face ao valor inicial.

4.4.3. Comportamento à flexão

No ensaio de flexão, os provetes foram ensaiados até ser atingida a carga máxima, que não correspondeu ao colapso dos provetes; de facto, após ser atingida a carga máxima, os provetes apresentaram uma tensão residual muito significativa, que aumentou com o deslocamento imposto, sem voltar a atingir a tensão máxima. Tal como nos restantes ensaios, o modo de rotura não foi afetado pelo envelhecimento higrotérmico, no entanto, o comportamento em flexão e as propriedades associadas a este ensaio sofreram alterações significativas.

Na Figura 32, são apresentadas as curvas representativas de tensão vs. deformação para o ambiente de envelhecimento mais agressivo (W60), como exemplo elucidativo do modo como a resistência (σ_f) e o módulo de elasticidade (E_f) à flexão foram afetados. A observação dos gráficos mostra que, à semelhança do verificado nos restantes ensaios, há uma tendência generalizada de redução da resistência à flexão com o aumento da exposição temporal no ambiente de envelhecimento em questão. No entanto, a rigidez inicial dos provetes manteve-se inalterada, tendo, em alguns ambientes (W60 6m (S)), apresentado um ligeiro aumento.

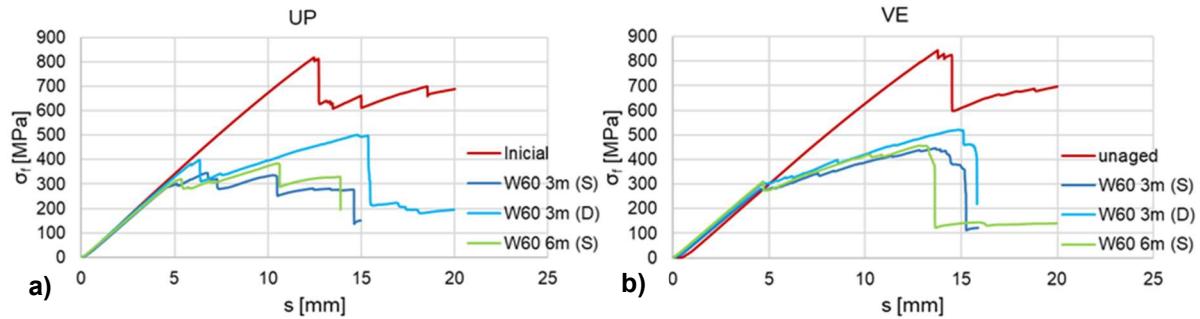


Figura 32 – Curvas de tensão vs. deformação do ensaio flexão, para diferentes períodos de envelhecimento em imersão em água a 60 °C: perfil (a) UP e (b) VE.

É interessante sublinhar que, após a rotura das primeiras camadas de reforço situadas na parte superior do provete (rotura por compressão), ocorre uma redistribuição das tensões ao longo da espessura dos provetes, permitindo alguma recuperação da tensão com a continuação da imposição de carregamento, até nova rotura de uma camada de reforço fibroso, o que é patente nas curvas apresentadas através das sucessivas reduções de tensão. Estas primeiras roturas das camadas de reforço estão em concordância com uma maior degradação da matriz e uma menor adesão fibra-matriz, aumentando a propensão para a rotura de camadas individuais sujeitas a maiores tensões de esforço e/ou à delaminação entre camadas. Nos provetes não envelhecidos, o comportamento foi linear até ser atingida a tensão máxima; já nos provetes envelhecidos, antes de ser atingida a tensão máxima, verificam-se uma ou mais reduções de rigidez, associadas à progressão do dano nas diferentes camadas de reforço.

Na Figura 33, são apresentados, sob a forma de gráficos de barras, os efeitos que os diferentes tipos de ambiente e períodos de imersão provocaram na resistência à flexão dos provetes de resinas UP e VE.

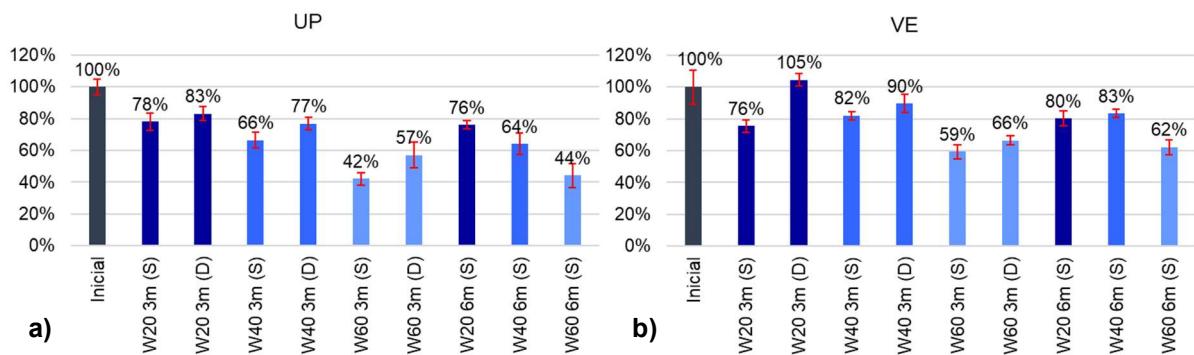


Figura 33 – Variação da resistência à flexão, para os diferentes ambientes de envelhecimento e perfis: (a) UP e (b) VE.

Como esperado e tal como concluído para os restantes ensaios, também a degradação da resistência à flexão aumentou com o aumento da temperatura de imersão, sendo a mais gravosa, a que ocorreu para uma imersão a 60 °C. Ambos os perfis apresentaram comportamento semelhante, ao nível da percentagem de retenção da resistência à flexão, consoante o ambiente de exposição.

Iniciando esta análise pelos dados adquiridos para o primeiro período de imersão, 3 meses, para o ambiente W20, verificou-se uma acentuada redução na retenção da resistência (22% e 24%, para os compósitos de UP e VE, respetivamente), tendo-se observado uma recuperação desta propriedade no estado seco, maior para o VE (29%) do que para o UP (5%). Estes resultados permitem concluir que a degradação ocorrida na resina UP foi maioritariamente química e de carácter irreversível, enquanto para a resina de VE, a recuperação foi total, tendo mesmo ocorrido uma melhoria na retenção da resistência face ao valor inicial; tal facto mostra que, para além da degradação ocorrida no material VE ter sido essencialmente física, ocorreu também pós-cura significativa. Para a resina UP, a tendência acima referida verifica-se também para as restantes temperaturas ao longo dos primeiros 3 meses, sendo a degradação proporcional ao aumento da temperatura, com uma recuperação por secagem gradualmente menor. No caso da resina de VE, os resultados para o ambiente W40 3m são semelhantes aos observados para o ensaio de compressão, verificando-se uma menor degradação no estado saturado do que a observada no ambiente W20 3m. Tal pode ser explicado pelo mesmo facto anteriormente referido, relativo ao grau de cura da placa de VE introduzida para W20 3m, constituindo assim, uma dúvida transversal a todos os resultados obtidos desta e associados a uma redução da resistência inexplicável. Neste ensaio, e tal como no de compressão, esta situação torna-se evidente uma vez que a matriz apresenta uma forte influência no modo de rotura observado (por compressão na parte superior do provete, tendo apenas em alguns casos ocorrido rotura por tração na zona inferior) e, como referido, o ambiente W40 terá promovido a pós-cura da matriz de VE.

No período seguinte, para uma imersão durante 6 meses nos ambientes descritos, verificou-se também, um aumento da degradação proporcional ao aumento da temperatura para os perfis de UP (24, 36 e 56%, respetivamente W20, W40 e W60). Já para o perfil de VE, a degradação ocorrida para W20 foi superior à de W40 (20 e 17%, respetivamente), apresentando uma relação menos linear com a temperatura. Para ambas as resinas, foi verificada uma redução na taxa de degradação ocorrida, o que sugere, novamente, uma tendência de estabilização dos valores de retenção para um patamar para os períodos de imersão seguintes.

Os resultados obtidos no presente estudo são coerentes com os obtidos por Cabral-Fonseca *et al.* [33] e por Sousa *et al.* [13] (que analisaram compósitos pultrudidos de GFRP com resinas de UP e VE), uma vez que em ambos os estudos também foi notório o aumento do nível de degradação com o aumento da temperatura do meio de imersão, sendo máximo no ambiente de imersão a 60 °C (equivalente ao W60 do presente estudo). Naqueles estudos, com o aumento do período de imersão, também ocorreu uma diminuição da resistência de forma mais gradual e contínua, por comparação, por exemplo, com o ensaio de tração, tendo essa redução estabilizado num certo patamar de retenção, e não se tendo registado recuperação em nenhum dos ambientes, excetuando nos provetes testados no estado seco.

4.4.4. Comportamento ao corte no plano

A Figura 34 apresenta as curvas representativas de tensão vs. deformação por corte no plano para ambos os materiais, para o ambiente de envelhecimento mais agressivo (W60), como exemplo das alterações exibidas na resistência ao corte (τ) e no módulo de distorção (G).

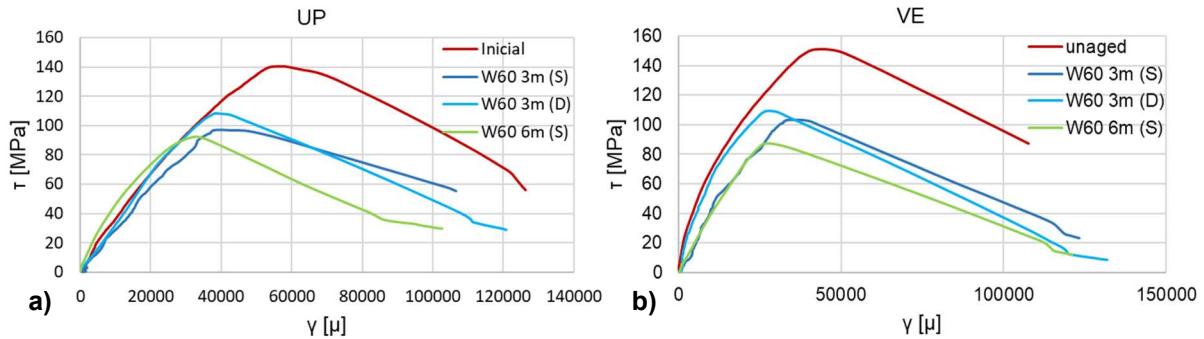


Figura 34 – Curvas de tensão vs. deformação por corte no plano, para diferentes períodos de envelhecimento em imersão em água a 60 °C: perfil (a) UP e (b) VE.

A redução de ambas as propriedades evoluiu com o aumento do período de envelhecimento, sendo mais notória no caso da resistência ao corte. Os gráficos da Figura 34 mostram que, apesar de num estado virgem a resistência dos provetes com resina de VE ser maior do que nos provetes com resina de UP, após envelhecimento, a resistência de ambos os materiais tornou-se semelhante. Para ambos os cenários, com a secagem do material, ocorreu recuperação quer da resistência ao corte, quer do módulo de distorção.

A Figura 35 sumariza o efeito do envelhecimento higrotérmico na resistência ao corte no plano, para os provetes de UP e VE, para todos os ambientes de envelhecimento.

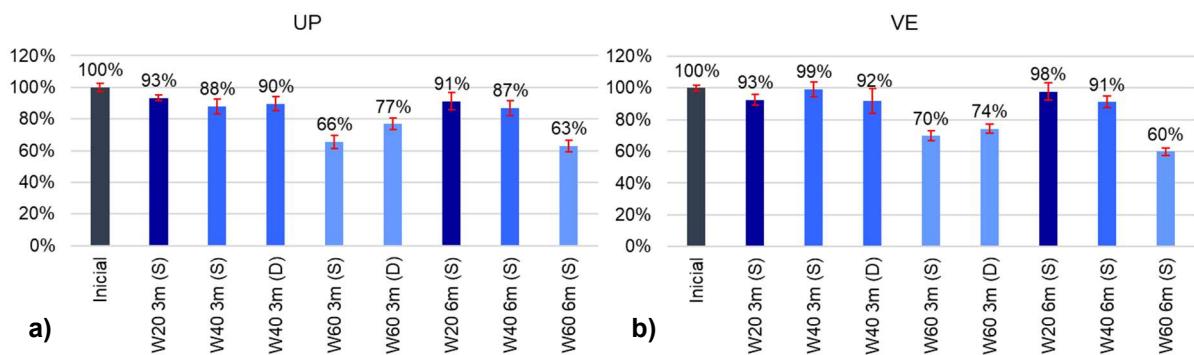


Figura 35 – Variação da resistência ao corte no plano, para os diferentes ambientes de envelhecimento e perfis: (a) UP e (b) VE.

Os efeitos do envelhecimento higrotérmico na resistência ao corte no plano correspondem a uma tendência geral de degradação, com uma notória redução da resistência com o aumento do período e temperatura de exposição, especialmente para o ambiente W60. Estes efeitos são normalmente associados à plasticização e hidrólise da matriz polimérica e outros mecanismos de degradação, como a microfendilhação, os quais contribuem para reduzir as propriedades ao corte [49].

Sendo as propriedades ao corte no plano do GFRP garantidas em grande medida pela matriz (embora também haja influência muito significativa das fibras, dada a arquitetura do reforço adotada com fibras orientadas a $\pm 45^\circ$), a resina que apresentar melhores características será aquela que irá conferir uma maior resistência ao corte ao material. Desta maneira, sendo a resina de VE mais resistente quimicamente, apresentando uma maior resistência mecânica na maioria dos ensaios, seria de esperar que a degradação ocorrida fosse menor neste material. Os resultados ilustrados na Figura 35 mostram que, de um modo geral, tal é confirmado, no entanto, não de uma forma tão evidente quanto o esperado, uma vez que a percentagem de retenção da resistência ao corte é apenas ligeiramente inferior para a resina de VE do que para a resina de UP (com exceção do ambiente W60 6m (S)).

De forma mais detalhada, para os ambientes W20 e W40, após 3 meses, ambas as resinas apresentaram apenas uma ligeira redução na resistência ao corte (entre 1% e 12%), a qual parece ter progredido para um patamar de estabilização no período de imersão seguinte, 6 meses. Para a imersão a 60°C , a resistência foi afetada de maneira mais expressiva, tendo ocorrido uma maior redução na retenção desta propriedade (entre 23% e 34%).

Tal como para os restantes ensaios, a resistência dos provetes no estado seco, por comparação ao saturado, foi superior. Assim, conclui-se novamente que parte da degradação foi de carácter reversível (plasticização), tendo sido recuperada com a secagem do material. No entanto, por se tratar de uma propriedade para a qual existe uma forte contribuição da matriz e da interface fibra-matriz, e tendo ocorrido também degradação destas com carácter irreversível, a recuperação da resistência ao corte foi menos significativa.

Novamente, no presente ensaio, parece existir uma tendência de estabilização dos valores de resistência (ao corte) a partir dos 6 meses, período para o qual se verificou uma diminuição na taxa de redução da percentagem de retenção. No entanto, para confirmar tal conclusão será necessário aguardar pelos resultados futuros dos ensaios previstos no projeto “Durable-FRP”.

Sousa *et al.* [13], nos seus estudos sobre o envelhecimento higrotérmico de compósitos pultrudidos de GFRP (ensaíados sempre no estado seco), obtiveram resultados muito semelhantes em ensaios ao corte no plano, tendo também reportado uma degradação com uma notória redução da resistência com o tempo e temperatura de exposição. Os mecanismos de degradação identificados naquele estudo foram essencialmente a plasticização e a microfendilhação, sendo também a resina de VE a que apresentou maior durabilidade. Os autores também reportaram uma tendência para um patamar de estabilização, sendo que os seus ensaios se estenderam por períodos temporais maiores, o que está em concordância com a tendência aqui encontrada. Os resultados obtidos pelos autores não permitiram identificar sinais de recuperação das propriedades ao corte ao longo do tempo, o que se justificou pelo facto deste ensaio ser bastante dominado pela matriz e pela interface fibra-matriz, as quais foram bastante influenciadas pela degradação.

A Figura 36 sumariza o efeito do envelhecimento higrotérmico no módulo de distorção (G) dos provetes por corte no plano, para as resinas UP e VE e para os diferentes ambientes de envelhecimento.

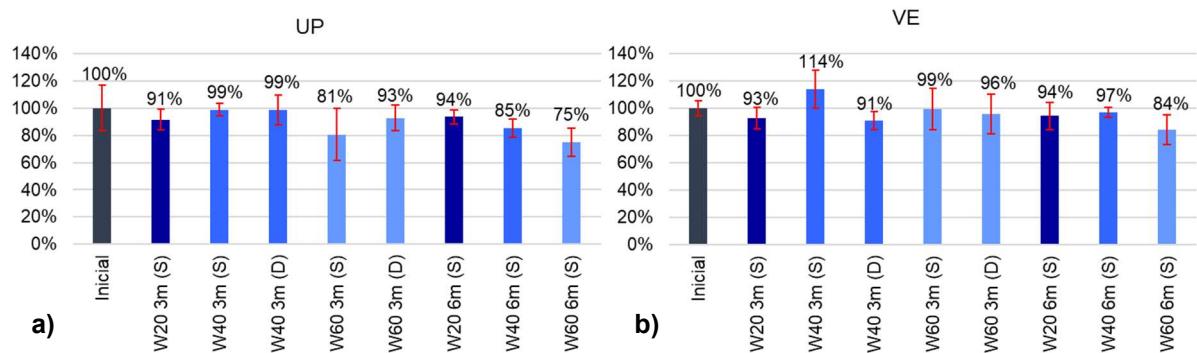


Figura 36 – Variação do módulo de distorção por corte no plano, para os diferentes ambientes de envelhecimento e perfis: (a) UP e (b) VE.

Os gráficos da Figura 36 mostram que o módulo de distorção apresenta uma redução até aos 6 meses, evoluindo com o tempo e o aumento da temperatura. No entanto, apesar de se poder afirmar que existe uma dependência da temperatura, esta é menos notória quando comparada com a verificada na resistência ao corte, apresentando também uma maior dispersão (barras de erro maiores). Esta maior variabilidade (coeficiente de variação médio de 10% para os vários ambientes) deve-se à natureza intrínseca desta propriedade e, também, à precisão da técnica de medição (vídeo-extensometria).

A redução do módulo de distorção de maior valor ocorreu para um período de imersão de 6 meses no ambiente W60 (25% e 16%, para UP e VE, respetivamente). Em termos de degradação geral, as duas resinas equipararam-se. É de interesse sublinhar a existência de uma elevada recuperação e, até, de uma melhoria para a resina de VE (114% de retenção) após 3 meses de imersão em W40. Tal pode ser justificado pela hipótese já referida para este ambiente W40, que terá proporcionado a ocorrência de fenómenos de pós-cura com reticulação adicional da resina e, consequentemente, melhoria das suas características.

Relativamente a estes valores do módulo de distorção, por comparação com o estudo de Sousa *et al.* [13], estes autores também verificaram uma menor dependência daquela propriedade com a temperatura e uma variação do módulo mais irregular e com maior dispersão. Nesse estudo, as maiores reduções ocorreram nos perfis com resina de VE para períodos de imersão superiores; os autores justificaram as menores reduções nos perfis com resina de UP pela sua maior suscetibilidade aos efeitos de pós-cura, o que não se verificou na presente campanha.

4.4.5. Comportamento ao corte interlaminar

O ensaio de corte interlaminar tem por objetivo avaliar a resistência interlaminar entre camadas de reforço, dependendo da resistência da matriz polimérica e da interface fibra-matriz quando o material é sujeito a um esforço de corte rasante. Este ensaio é muito importante para a caracterização do material compósito, permitindo avaliar a influência do envelhecimento higrotérmico na matriz e na interface fibra-matriz, fundamental para o desempenho do GFRP ao longo da sua vida útil.

A Figura 37 apresenta curvas representativas tensão de corte interlaminar vs. deslocamento a meio vão para cada um dos tempos de imersão em estudo e para o ambiente de envelhecimento mais crítico (W60).

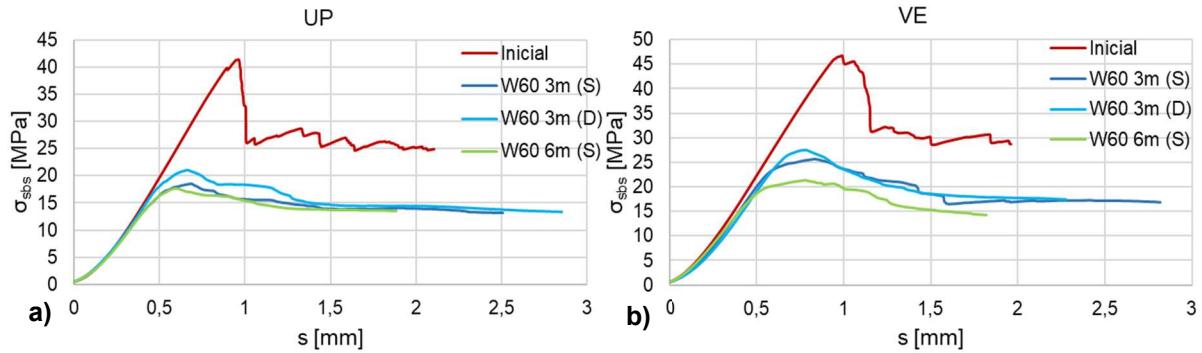


Figura 37 – Curvas de tensão vs. deslocamento a meio vão do ensaio de corte interlaminar, para diferentes períodos de envelhecimento em imersão em água a 60 °C: perfil (a) UP e (b) VE.

Os gráficos da Figura 37 mostram que o comportamento inicial linear se mantém com o envelhecimento higrotérmico, mas que este tem um efeito negativo muito significativo na resistência ao corte interlaminar de ambos os materiais, sendo este mais gravoso para a resina de UP. Contudo, e não obstante a elevada dispersão de resultados (reportada adiante), para a resina de UP, a recuperação por secagem foi maior, e o aumento de degradação entre os 3 e 6 meses de imersão foi mais pronunciado para a resina de VE.

Na Figura 38 são apresentadas as retenções da resistência ao corte interlaminar para os diferentes ambientes de envelhecimento e para os diferentes períodos de imersão, dos GFRP produzidos com resina UP e VE.

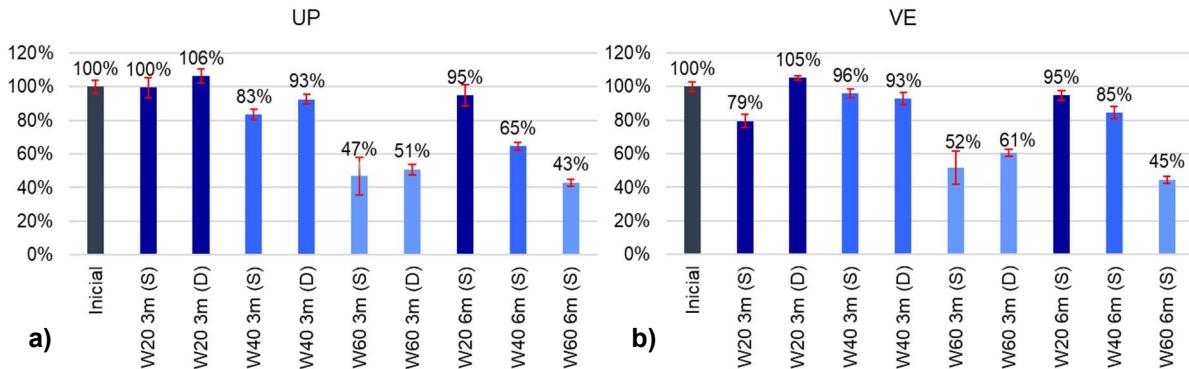


Figura 38 – Variação da resistência ao corte interlaminar, para os diferentes ambientes de envelhecimento e perfis: (a) UP e (b) VE.

A Figura 38 mostra que a resistência ao corte interlaminar de ambos os compósitos apresentou uma tendência de redução, cuja magnitude aumentou com o período de exposição, notando-se contudo uma tendência de evolução para um patamar de estabilização para o período de imersão de 6 meses. Relativamente aos diferentes ambientes, a redução da retenção foi ainda mais evidente, com o aumento da temperatura.

Entre os diferentes ensaios realizados no presente estudo, este foi aquele em que ambos os materiais GFRP apresentaram maior degradação, sendo esta geralmente maior para a resina de UP (exceto no ambiente W20, em que a resina de VE se degradou mais). Para a temperatura de 20 °C, no caso do compósito com resina de UP, atendendo à variabilidade dos resultados, não ocorreu degradação significativa; esta degradação foi claramente mais gravosa para o compósito com resina de VE, que apresentou degradação máxima de 21%. Este elevado valor de degradação tem uma vez mais, origem na placa de VE com grau de cura questionável, sendo este um ensaio dominado pelas propriedades da matriz, um grau de cura inferior terá repercussões nas resistências apresentadas. No entanto, para o ambiente em causa, a degradação verificada nos provetes de VE ocorreu, na sua globalidade, devido a reações reversíveis, como a plasticização, já que, após secagem, verificou-se uma recuperação total da resistência, verificando-se até um aumento face ao valor inicial (após 3 meses). Esta melhoria está associada a efeitos de pós-cura, também observados, por exemplo, nos ensaios de flexão e de corte no plano.

No caso do ambiente W40, após 3 meses de imersão, a degradação do compósito de UP (redução de 17%) foi mais gravosa do que no de VE (apenas 4%). O motivo desta diferença é explicado pela hipótese já apresentada para ensaios dominados pelas características da matriz: a resina de VE aparenta possuir mais componentes na sua composição que, não obstante o procedimento de pós-cura, terão sido suscetíveis a cura adicional, nomeadamente na presença de temperatura elevada (40 °C); naturalmente, existe uma competição entre os mecanismos de degradação e os efeitos da pós-cura.

No caso do ambiente W60, este foi o ambiente no qual os provetes sofreram uma maior redução da propriedade em estudo. O efeito higrotérmico dos 60 °C no GFRP proporcionou não só a ocorrência de plasticização, mas também de hidrólise, reação química que degrada, permanentemente, o GFRP. O resultado destes efeitos é muito superior à de possíveis melhorias causadas por alguma pós-cura, tornando a resistência final deste material envelhecido, muito inferior à inicial, com reduções muito significativas de 57% e 55%, respetivamente nos compósitos com resinas de UP e VE.

Importante referir que este foi um dos ensaios (flexão com degradação igualmente gravosa) em que os ambientes de envelhecimento higrotérmicos tiveram mais impacto na resistência. Tal deve-se ao facto de a resistência ao corte interlaminar ser uma propriedade dominada essencialmente pelas características da matriz e da interface fibra-matriz, ambas mais suscetíveis àquele tipo de degradação do que as fibras de reforço, menos relevantes para esta propriedade. Assim, as maiores degradações ocorrem para as temperaturas mais elevadas, que, para além da plasticização e hidrólise da matriz, poderão também promover degradação da interface e propagação e coalescência de microfissuras, promovendo o enfraquecimento do GFRP por entrada de humidade [80]. Esta hipótese poderá ser verificada ou validada por análises de microscopia.

Nos estudos de Cabral *et al.* [33] e Sousa *et al.* [13], tal como na presente campanha experimental, a resistência ao corte interlaminar exibiu uma tendência generalizada de redução em função do tempo e temperatura de imersão. Em ambos os estudos, em que os períodos de imersão foram superiores (18 e 24 meses) ao deste trabalho, verificou-se uma tendência de estabilização da retenção da resistência,

aqui colocada como hipótese. Sousa *et al.* [13] verificaram que os perfis com resina de VE apresentaram alguma recuperação da resistência ao corte interlaminar após 9 meses de imersão, tendência que também foi verificada na atual campanha, nomeadamente para o ambiente W40 em estado saturado, entre 3 e 6 meses.

4.5. Considerações finais

No presente capítulo, foram apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos, relativos aos efeitos higrotérmicos a nível termomecânico e mecânico de dois compósitos de GFRP, um constituído por matriz polimérica de UP e outro de VE. Este estudo teve por objetivo caracterizar a durabilidade destes materiais, da maneira mais completa possível, de forma a permitir a sua aplicação na engenharia civil.

Na Tabela 11 e Tabela 12 apresenta-se uma síntese dos valores de retenção da resistência (%), obtidos para cada ambiente de exposição e respetivo período de imersão. A Tabela 11 diz respeito aos provetes testados no estado saturado e a Tabela 12 aos provetes testados no estado seco. Como forma de facilitar a leitura destas tabelas, utilizou-se uma escala de cores, onde a “verde” são salientadas percentagens de retenção superiores, relativas a material com maior resistência aos efeitos da degradação higrotérmica, a “vermelho”, identificam-se as percentagens de retenção menores, associadas a uma menor durabilidade deste material quando sujeito a este tipo de ambientes.

Tabela 11 – Quadro resumo dos valores de retenção da resistência (%) para cada tipo de ensaio, no estado saturado.

Resina	Tipo de ensaio	Ambiente e período de imersão					
		W20		W40		W60	
		3m	6m	3m	6m	3m	6m
UP	DMA (T_g^{onset})	92%	88%	87%	-	91%	92%
	Tração	98%	93%	92%	91%	76%	69%
	Compressão	94%	86%	75%	70%	48%	46%
	Flexão	78%	76%	66%	64%	42%	44%
	Corte no plano	93%	91%	88%	87%	66%	63%
	Corte interlaminar	100%	95%	83%	65%	47%	43%
VE	DMA (T_g^{onset})	93%	94%	95%	-	95%	98%
	Tração	88%	93%	94%	92%	66%	57%
	Compressão	63%	91%	84%	69%	45%	44%
	Flexão	76%	80%	82%	83%	59%	62%
	Corte no plano	93%	98%	99%	91%	70%	60%
	Corte interlaminar	79%	95%	96%	85%	52%	45%

Tabela 12 – Quadro resumo dos valores de retenção da resistência (%) para cada tipo de ensaio, no estado seco.

Resina	Tipo de ensaio	Ambiente e periodo de imersão		
		W20	W40	W60
		3m D		
UP	DMA (T_g "onset")	95%	-	96%
	Tração	99%	96%	78%
	Compressão	103%	95%	58%
	Flexão	83%	77%	57%
	Corte no plano	-	90%	77%
	Corte interlaminar	106%	93%	51%
VE	DMA (T_g "onset")	97%	-	102%
	Tração	100%	94%	65%
	Compressão	86%	91%	55%
	Flexão	105%	90%	66%
	Corte no plano	-	92%	74%
	Corte interlaminar	105%	93%	61%

Por observação das Tabela 11 e 12 e como era esperado, a maior concentração de tons vermelhos (menor retenção da resistência) é encontrada para o ambiente W60, tendo sido, também, menor a retenção para um período de 6 meses, por comparação com 3 meses. O ambiente W20, por oposição a W60, é onde são verificadas as maiores percentagens de retenção (maior concentração de tons verdes), sendo este o ambiente que afetou menos as resistências. O ambiente W40 é considerado um ambiente intermédio, pois se por um lado uma temperatura superior (40 °C vs. 20 °C) tem um maior efeito na degradação física e química da resina, os 40 °C aí encontrados favorecem a ocorrência de pós-cura, efeito este que irá competir com os causados pela degradação, melhorando, por vezes, o desempenho do material. Tal efeito foi particularmente notório nos provetes com resina VE.

Por regra, os provetes constituídos por resina de VE apresentaram melhor desempenho do que os com resina de UP. Esta melhor durabilidade apresentada pelos provetes de VE foi especialmente mais notória nos ensaios em que as propriedades testadas eram mais dependentes da matriz.

Analizando os resultados obtidos da retenção das resistências dos provetes testados no estado seco, de maneira geral e por comparação ao estado saturado, estes foram superiores (maior concentração de tons verdes). Ao testar o material num estado seco foi possível aferir, para cada ensaio, a percentagem da degradação de carácter físico e reversível, associado à plasticização, e recuperável com a secagem do material. Como esta recuperação corresponde inteiramente a uma recuperação das propriedades intrínsecas da matriz, a referida melhoria após secagem foi mais evidente em ensaios dominados por esta componente.

Fazendo uma análise mais pormenorizada dos resultados obtidos dos provetes ensaiados no estado saturado, e começando pelo ensaio DMA, é possível afirmar que a propriedade obtida e estudada a partir da concretização deste ensaio (T_g "onset") apresenta pouca vulnerabilidade aquando sujeita a este tipo de

ambiente de envelhecimento, pois a degradação ocorrida tem pouca expressão. Para além do referido, é pouco notória uma relação entre a retenção e a temperatura de imersão.

Relativamente aos resultados do ensaio à tração, o envelhecimento higrotérmico afetou pouco (por comparação aos restantes) as propriedades do GFRP, sendo este o ensaio mecânico com melhores retenções. A relação da degradação com a temperatura não foi clara, pois esta, apesar de ser uma propriedade influenciada pela matriz, é também muito condicionada pelas fibras, as quais para as temperaturas e períodos de imersão aqui considerados, não sofrem degradação. No entanto, no ambiente mais agressivo (W60) foi verificada uma degradação superior. Tal pode ser justificado, pelos mecanismos de degradação aqui ocorridos, que irão afetar principalmente a matriz, impedirem a distribuição uniforme de tensões entre as fibras (interface), piorando o desempenho do material. Este é o único ensaio em que a resina VE teve desempenho inferior.

Nos ensaios de compressão, por comparação com os de tração, a resistência à compressão apresentou um nível de degradação mais elevado, já que esta propriedade é mais dominada pela matriz, componente mais sensível e dependente da humidade, do que a resistência à tração. Assim, registou-se um aumento da degradação da resistência à compressão com elevada relação com a temperatura de imersão.

A resistência à flexão foi o ensaio que apresentou maior degradação devido aos efeitos do envelhecimento higrotérmico, sendo ainda mais gravosa para o GFRP constituído por resina UP. Neste ensaio, a dependência da resistência com o tempo e temperatura de imersão foi extremamente evidente. A elevada degradação é justificada pelo facto de este ensaio ser essencialmente dominado pela matriz e pela interface, as quais sofrem uma elevada degradação quando expostas a um ambiente higrotérmico, alterando as suas características e impedindo o correto desempenho do GFRP.

De uma maneira geral, a resistência ao corte no plano mostrou uma redução da sua retenção associada ao tempo e à temperatura, sendo tanto maior a degradação quanto maior a temperatura. No entanto, os ambientes W20 e W40, parecem ter pouco efeito na degradação do material, principalmente para VE. O que se justifica com o facto deste ensaio, apesar de bastante influenciado pela matriz, ter também uma componente da resistência ao corte dependente do reforço fibroso, a qual não sofre degradação.

Por fim, no ensaio de corte interlaminar, verificou-se a mesma tendência observada no ensaio de corte no plano; no entanto, os valores de degradação observados foram bastante superiores. Tal pode ser justificado pelo facto deste ensaio depender quase exclusivamente da matriz e da interface fibra-matriz, enquanto no ensaio de corte no plano, como referido, depende também das fibras (dada a arquitetura dos laminados utilizados neste estudo). Desta maneira, a degradação aumentou com a temperatura de exposição.

Conclui-se, assim, que consoante o tipo de ensaio, mais dominado pelo reforço fibroso ou mais dominado pela matriz e pela interface, registam-se diferentes níveis de degradação. Os efeitos do envelhecimento higrotérmico são mais notórios nas propriedades mais dominadas pela matriz, apresentando degradação mais severa para valores de temperatura mais elevados. Assim, quanto maior for a resistência, durabilidade e estabilidade química da matriz polimérica considerada, melhor será o seu desempenho a longo prazo e mais elevados serão os valores de retenção das propriedades mecânicas.

5. Conclusões e perspetivas de desenvolvimentos futuros

5.1. Conclusões

O sector da construção está a atravessar uma fase em que a necessidade de renovação de infraestruturas é crescente; essa necessidade deve-se, em muitos casos, a problemas associados à durabilidade dos materiais tradicionais, como o aço e o betão armado, ou a maiores exigências de desempenho [3]. Neste contexto, a escolha deste tipo de materiais convencionais, quer para intervenções de reabilitação, quer para obras novas (sobretudo em ambientes relativamente agressivos), começa a ser questionada, pela sua durabilidade limitada e, também, pelos custos crescentes inerentes à sua manutenção. Assim, gradualmente, a procura por materiais inovadores mais duráveis tem aumentado, com os FRP a desempenharem um papel fundamental [33].

A crescente escolha de FRP para diversas aplicações construtivas é facilmente explicável pela sua leveza, elevada resistência, transparência eletromagnética, não corrosibilidade e reduzidas necessidades de manutenção. No entanto, estes materiais ainda são raramente escolhidos para aplicações estruturais da engenharia civil. Tal situação advém do facto destes materiais também apresentarem algumas desvantagens, que previnem a sua maior aceitação, como por exemplo: custos iniciais elevados; reduzidos valores de módulo de elasticidade e módulo de distorção (particularmente em compósitos de fibra de vidro, GFRP); rotura frágil; falta de informação sobre diversos aspectos do seu comportamento; inexistência de regulamentação consensual (por exemplo, um Eurocódigo) [33]. Outro ponto crítico que não favorece uma maior aceitação dos FRP na construção são as questões associadas à sua durabilidade; de facto, não obstante as evidências sobre a sua elevada durabilidade em condições de serviço relativamente agressivas, existem ainda muitas questões sobre o seu desempenho a longo prazo (principalmente para tempos de vida útil elevados, típicos da engenharia civil – 50 a 100 anos).

A presente dissertação de mestrado foi desenvolvida neste contexto e o seu principal objetivo foi estudar a durabilidade de dois compósitos de GFRP produzidos por infusão a vácuo, com matrizes poliméricas distintas – poliéster insaturado (UP) e viniléster (VE) – mas com o mesmo reforço fibroso, para aplicações estruturais em engenharia civil. Estes materiais foram sujeitos a um ambiente de degradação higrotérmico, que pode ser experienciado em aplicações da engenharia civil. Na investigação efetuada, ambos os GFRP foram analisados no que se refere ao seu comportamento mecânico e termomecânico, tendo o material sido testado antes e depois do envelhecimento higrotérmico, por imersão a 20 °C, 40 °C e 60 °C, quer no estado saturado, quer no estado seco. Assim, foi possível definir as diferentes características e propriedades iniciais destes materiais, e esclarecer a que mecanismos de degradação ficam sujeitos e de que forma é que as suas propriedades se degradam neste tipo de ambiente. É importante salientar que o envelhecimento aqui experienciado, sendo representativo de aplicações em que o material está efetivamente submerso, foi mais gravoso do que o experienciado pelo material quando numa situação real; contudo, os resultados aqui obtidos podem ser utilizados para extrapolar o envelhecimento realizado para períodos mais longos.

A campanha experimental foi bem-sucedida e os resultados obtidos foram, em geral, de acordo com o esperado, pelo que se pode afirmar que os objetivos definidos foram cumpridos. A investigação desenvolvida permitiu caracterizar a degradação higrotérmica dos dois tipos de GFRP estudados, tendo permitido concluir que existe uma elevada dependência entre a degradação e a temperatura e período de imersão. As maiores degradações foram registadas para as temperaturas mais elevadas e para os períodos de imersão mais longos (6 meses). De uma maneira geral, para as mesmas condições de temperatura e período de imersão, os provetes constituídos por resina de VE apresentaram maiores retenções das diferentes propriedades, ou seja, melhor durabilidade, por comparação com os provetes de UP. Este resultado está de acordo com o reportado em vários estudos, sobre o melhor desempenho de resinas de viniléster em ambientes aquosos por comparação com as resinas de poliéster insaturado.

De um ponto de vista termomecânico, ambos os GFRP apresentaram pouca degradação causada pelo envelhecimento higrotérmico a que foram sujeitos, não sendo evidente a dependência da T_g^{onset} com a temperatura e período de imersão. Desta maneira, a T_g^{onset} destes GFRP foi pouco afetada pelos mecanismos de degradação, mantendo-se aproximadamente constante e registando uma degradação máxima de 13% e 7%, para os GFRP com UP e VE, respetivamente. Neste ensaio, não foram encontradas evidências de pós-cura, que se teria refletido num aumento da T_g^{onset} ; naturalmente, eventuais efeitos de pós-cura também poderão ter sido mascarados pela degradação associada à penetração da humidade no material.

O envelhecimento higrotérmico afetou negativamente as propriedades mecânicas de ambos os GFRP, registando-se uma notória dependência da degradação com a temperatura, que foi de maior magnitude nas resistências, do que nos módulos elásticos. Por vezes, registou-se recuperação e até melhoria de algumas propriedades, o que estará relacionado com os efeitos de pós-cura acima referidos. Como referido, a ocorrência de pós-cura proporciona um efeito positivo no material, o qual irá competir com os mecanismos de degradação. Esta recuperação e melhoria da retenção está também, na maioria dos cenários, associada ao processo de secagem conferido aos provetes. O facto de se secar os provetes até massa constante garante que se recupera a degradação ocorrida por reações de carácter reversível, associadas à plasticização. Tal como para a degradação, também a recuperação das propriedades apresenta maior evidência de ocorrência nas resistências (que, para várias solicitações, dependem significativamente da matriz polimérica), sendo pouco notória nos módulos elásticos (que, para várias solicitações, dependem sobretudo das fibras de reforço).

De uma maneira geral, as maiores degradações ocorreram para períodos de imersão de 6 meses no ambiente mais agressivo (W60), registando-se degradações máximas de 58% e 56%, para UP e VE, respetivamente. Na maioria dos ensaios mecânicos, verificou-se uma diminuição da taxa de degradação para o período de imersão de 6 meses, o que aponta para uma tendência de estabilização do valor da retenção para um patamar. Esta hipótese deverá ser confirmada com ensaios futuros a realizar no âmbito do projeto “Durable-FRP”.

Dos vários ensaios mecânicos, o ensaio à tração foi aquele em que o material GFRP apresentou menor degradação (até 31% e 43%, para UP e VE, respetivamente), e o ensaio de flexão foi aquele em que a degradação foi maior (até 58% e 41% para UP e VE, respetivamente). As diferenças encontradas

foram explicadas pelo tipo de ensaio propriamente dito. As propriedades em tração são muito dominadas pelas fibras (sobretudo no caso do módulo elástico), as quais, quando imersas em água desmineralizada a temperaturas pouco elevadas (mesmo para 60 °C) não sofrem degradação muito significativa, sendo por isso o desempenho do GFRP pouco afetado. Por oposição, as propriedades testadas com o ensaio de flexão, e também para corte interlaminar (degradação máxima de 57% e 55%, UP e VE, respetivamente) e compressão (degradação máxima de 54% e 56%, UP e VE, respetivamente), são muito influenciadas pelas propriedades da matriz e, também, pela interface fibra-matriz (que também afeta a resistência à tração). Assim, sendo a matriz polimérica bastante sensível à humidade, principalmente com temperatura, as degradações ocorridas serão bastante superiores nestas propriedades. Para além do referido, ao danificar a matriz, a interface criada entre esta e o reforço fibroso também pode ser afetada (o que poderia ser comprovado por análises de microscopia), promovendo ainda mais a degradação do material do ponto de vista mecânico. Tal como nos ensaios referidos, também o de corte no plano apresenta uma elevada dependência da matriz polimérica, no entanto, parte desta resistência é também conferida pelo reforço fibroso, devido à arquitetura de fibras adotada nos provetas ensaiados. Desta maneira, a degradação aí ocorrida terá sido menos gravosa (até 37% e 40%, UP e VE, respetivamente) do que em propriedades dominadas essencialmente pela matriz.

Relativamente aos valores de módulo elástico obtidos nos diferentes ensaios, estes foram pouco afetados pela degradação higrotérmica, mantendo-se aproximadamente constantes. No caso do módulo elástico adquirido pelo ensaio à tração, obteve-se valores de degradação máxima até 9% e 2%, para UP e VE, respetivamente; enquanto, para o módulo elástico à compressão, a degradação máxima foi de 11% e 14%, para UP e VE, respetivamente. Estas degradações não apresentaram dependência nem com a temperatura, nem com o tempo de imersão. Este facto é uma vez mais justificado pelo facto dos módulos elásticos do material (associados à sua rigidez) serem essencialmente garantidos pelo reforço fibroso (sobretudo para algumas solicitações), o qual não terá sofrido uma degradação muito significativa para os ambientes em estudo. O módulo de distorção, obtido pelo ensaio de corte no plano, apresentou níveis de degradação ligeiramente superiores e uma maior dependência com a temperatura e período de imersão (superior aos restantes módulos, mas inferior à verificada para a resistência do material à mesma solicitação), obtendo-se valores de degradação máxima de 25% e 16%, para UP e VE, respetivamente.

5.2. Perspetivas de desenvolvimentos futuros

Com o desenvolvimento da presente dissertação, a qual se insere no âmbito do projeto “Durable-FRP”, foi dado um importante contributo para uma melhor compreensão do comportamento de compósitos de GFRP como material estrutural para aplicações na engenharia civil. O principal objeto de estudo foi a durabilidade e mecanismos de degradação que afetam o desempenho destes materiais quando sujeitos a envelhecimento higrotérmico. No entanto, vários aspetos da presente dissertação deverão ser mais desenvolvidos e aprofundados, favorecendo a maior aceitação deste material no sector da engenharia civil. Para tal, sugere-se que sejam desenvolvidos no futuro os seguintes tópicos:

- Do ponto de vista dos GFRP de UP e VE utilizados na presente dissertação, estes deverão continuar a seu processo de envelhecimento por períodos temporais mais longos (o que está previsto no projeto até um período de 20 anos), com a finalidade de obter dados sobre a sua durabilidade a longo prazo e melhor entender os processos de degradação e retenção das suas propriedades.
- Com o prolongar deste envelhecimento, será obtido um conjunto muito significativo de dados, que permitirão avaliar o ajuste de diferentes curvas e modelos de degradação, nomeadamente do tipo Arrhenius. Neste contexto, será importante aplicar e avaliar a capacidade deste tipo de modelos em fornecer estimativas fiáveis da degradação a longo prazo das propriedades destes materiais.
- Será também interessante estudar a durabilidade de materiais compósitos semelhantes aos aqui apresentados, em termos de tipo de resina e teor e arquitetura de fibras de reforço, mas alterando o processo de fabrico, por exemplo, para um dos métodos mais comuns de produção, a pultrusão. Assim, será possível avaliar a influência dos diferentes métodos de produção na durabilidade dos GFRP. Este aspeto já está a ser avaliado no projeto “Durable-FRP”; contudo, é de referir que nem sempre é possível garantir a manutenção exata dos materiais constituintes quando se varia o processo de fabrico (pelos suas especificidades).
- Será também interessante avaliar a influência do fabricante, testando materiais compósitos o mais semelhantes possível produzidos por diferentes fabricantes, comparando os resultados obtidos com os da presente dissertação.
- Poderá também ser interessante manter constantes todos os parâmetros referentes aos materiais constituintes, mas alterar um deles para avaliar a sua influência; por exemplo, manter as resinas e alterar o reforço fibroso para fibras de carbono, aramida ou basalto, ou vice-versa. Desta forma, o conhecimento da durabilidade destes materiais a longo prazo será alargado e poderá ser encontrada a melhor combinação de componentes para resistir aos diferentes ambientes de degradação.
- Algo que também se encontra já em desenvolvimento no referido projeto, e que é de extrema importância, é o estudo da durabilidade destes materiais quando sujeitos a outros ambientes de degradação, por exemplo: efeitos térmicos, ciclos térmicos, ciclos gelo-degelo, radiação UV, soluções ácidas e alcalinas, etc. Assim, será dado um contributo mais alargado e que cobrirá praticamente todos os diferentes ambientes aos quais uma estrutura de engenharia civil pode estar sujeita.
- Outro ponto importante consiste em avaliar o comportamento do material envelhecido não a temperatura ambiente, mas sim nas condições ambientais a que o material poderá estar sujeito em condições de serviço; por exemplo, o material envelhecido a 60 °C, poderá ser testado nestas mesmas condições. Assim, os resultados obtidos poderão representar de forma mais precisa a situação mais gravosa que poderá acontecer numa aplicação real; por exemplo no caso das pontes, quando a estrutura é exposta a um aumento de temperatura, o tráfego mantém-se, devendo este efeito ser considerado – na CEN/TS 19101: 2022 [48] este aspeto é considerado multiplicando um coeficiente de conversão da temperatura por um coeficiente de conversão para a humidade. O primeiro coeficiente foi obtido para material não envelhecido; será assim interessante avaliar se este coeficiente é aplicável, da mesma forma, a material envelhecido.

- Algo que também está previsto no âmbito do referido projeto e que é muito importante estudar, é a absorção de água em função da temperatura e período de exposição, e o modo como esta absorção de água influencia a degradação das propriedades mecânicas e termomecânicas.

- Outro ponto relevante é averiguar qual o desempenho do material apresentado nesta dissertação quando exposto a temperaturas elevadas e, até mesmo, em situação de incêndio. Deverá ser estudado o decaimento das suas propriedades e averiguar possíveis sistemas de proteção que melhorem o seu desempenho nas referidas condições.

- Os custos económicos e energéticos associados à produção de GFRP são elevados, sendo por isso importante desenvolver soluções ambientalmente mais sustentáveis que permitam alcançar as propriedades de um GFRP convencional, mas com impactes para o ambiente menores. Um exemplo disso é o projeto “EcoComposite”, em fase de conclusão pelo CORE Group do IST, em que foi feita uma substituição de resinas convencionais (produzidas por fontes fósseis, poluentes e não renováveis) por bio-resinas (com origem renovável) na produção de diferentes tipos de FRP.

- De acordo com os dados obtidos na presente dissertação, a matriz polimérica é bastante hidrofílica e sensível à presença de humidade, aumentando essa sensibilidade com a temperatura. Desta maneira, será importante estudar que componentes ou sistemas de proteção (por exemplo, revestimentos por pintura) deverão ser aplicados em compósitos GFRP (sobretudo em ambientes mais agressivos) de modo a atrasar, ou mesmo evitar, o processo de degradação que surge pelo contacto com os agentes referidos.

- Outro ponto importante passa por combinar os diferentes mecanismos de degradação (por exemplo, temperatura e radiação UV, ou imersão em solução ácida com temperatura). Assim, serão adquiridos dados mais semelhantes aos ambientes experienciados pelas estruturas de engenharia civil, uma vez que estas nunca se encontram expostas a um agente de degradação de forma isolada.

- O modelo de Arrhenius é um modelo matemático para estimar o decaimento das propriedades dos FRP a longo prazo; no entanto, apresenta algumas limitações, como por exemplo, o facto de assumir que a degradação é causada por um único agente. Assim, será importante desenvolver novos modelos matemáticos que permitam simular a degradação de compósitos FRP de uma forma mais correta e representativa da realidade.

- Por fim, um outro aspeto que também irá contribuir para a aceitação destes materiais no mercado da construção, será o desenvolvimento de estudos que permitam quantificar o custo de ciclo de vida de uma estrutura total ou parcialmente construída por FRP. Assim, será possível retirar conclusões concretas sobre a viabilidade económica e financeira deste material face aos tradicionais.

Com as conclusões e perspetivas para o futuro que a presente dissertação apresentou espera-se ter contribuído para uma maior aceitação dos FRP na engenharia civil, nomeadamente em aplicações estruturais. Os resultados obtidos poderão também ser incorporados no futuro, em regulamentação para o dimensionamento de estruturas, como é o caso da especificação técnica europeia recentemente aprovada, CEN/TS 19101: 2022 [48].

(página intencionalmente deixada em branco)

Referências

- [1] Bakis CE, Bank LC, Brown VL, Asce M, Cosenza E, Davalos JF, et al. Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction-State-of-the-Art Review. *Journal of Composites for Construction* 2002; 6:73–87. <https://doi.org/10.1061/ASCE1090-026820026:273>.
- [2] Zoghi M, editor. *The International Handbook of FRP Composites in Civil Engineering*. CRC Press; 2014.
- [3] Correia JR. Fibre-reinforced polymer (FRP) composites. *Materials for Construction and Civil Engineering: Science, Processing, and Design*, Springer International Publishing; 2015, p. 501–56. https://doi.org/10.1007/978-3-319-08236-3_11.
- [4] Karbhari VM, Chin JW, Hunston D, Benmokrane B, Juska T, Morgan R, et al. Durability Gap Analysis for Fiber-Reinforced Polymer Composites in Civil Infrastructure. *Journal of Composites for Construction* 2003; 7:238–47. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0268\(2003\)7:3\(238\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(2003)7:3(238)).
- [5] Bank LC. *Composites for construction: structural design with FRP materials*. John Wiley & Sons; 2006.
- [6] GangaRao HVS, Taly N, Vijay P v. *Reinforced Concrete Design with FRP Composites*. CRC Press; 2007.
- [7] Sousa JPGM de. Durability of pultruded GFRP profiles and adhesively bonded connections between GFRP adherends. *Tese de Doutoramento em Engenharia Civil*. Universidade de Lisboa - Instituto Superior Técnico, 2018.
- [8] Karbhari VM. *Durability of composites for civil structural applications*. Boca Raton, Florida: Woodhead Publishing; 2007.
- [9] Tracy CD. *Fire Endurance of Multicellular Panels in an FRP Building System*. PhD Thesis in Civil Engineering. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2005.
- [10] Gonilha JMCA. *GFRP-concrete hybrid structural systems. Application to the development of a footbridge prototype*. *Tese de Doutoramento em Engenharia Civil*. Universidade de Lisboa - Instituto Superior Técnico, 2014.
- [11] Wu H-C, Eamon CD. *Strengthening of Concrete Structures using Fiber Reinforced Polymers (FRP): Design, Construction and Practical Applications*. Woodhead Publishing; 2017.
- [12] Moussa O. *Thermophysical and Thermomechanical Behavior of Cold-Curing Structural Adhesives in Bridge Construction*. PhD Thesis in Civil Engineering. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2011.
- [13] Sousa JM, Garrido M, Correia JR, Cabral-Fonseca S. Hygrothermal ageing of pultruded GFRP profiles: Comparative study of unsaturated polyester and vinyl ester resin matrices. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2021; 140:106–93. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106193>.

[14] Adams DF, Carlsson LA, Pipes RB. *Experimental Characterization of Advanced Composite Materials*. CRC Press; 2003.

[15] CompositesWorld 2016. *Materials & Processes: Fabrication methods*. Consultado em: 31/10/2022. URL: <https://www.compositesworld.com/articles/fabrication-methods>.

[16] Grujicic M, Chittajallu KM, Walsh S. Non-isothermal preform infiltration during the vacuum-assisted resin transfer molding (VARTM) process. *Applied Surface Science* 2005; 245:51–64. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2004.09.123>.

[17] Rodrigues FB. Compósitos bio-derivados para aplicações estruturais em engenharia civil: avaliação experimental de bio-resinas epoxídicas e de poliéster insaturado. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de Lisboa - Instituto Superior Técnico, 2021.

[18] Keller T. Overview of fibre-reinforced polymers in bridge construction. *Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)* 2002; 12:66–70. <https://doi.org/10.2749/101686602777965595>.

[19] Hai ND, Mutsuyoshi H, Asamoto S, Matsui T. Structural behavior of hybrid FRP composite I-beam. *Construction and Building Materials* 2010; 24:956–69. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.11.022>.

[20] Braestrup MW. Footbridge Constructed from Glass-Fibre-Reinforced Profiles, Denmark. *Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)* 1999; 9:256–8. <https://doi.org/10.2749/101686699780481709>.

[21] Karbhari VM, Abanilla MA. Design factors, reliability, and durability prediction of wet layup carbon/epoxy used in external strengthening. *Composites Part B: Engineering* 2007; 38:10–23. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2006.06.001>.

[22] Li H, Xian G, Lin Q, Zhang H. Freeze-thaw resistance of unidirectional-fiber-reinforced epoxy composites. *Journal of Applied Polymer Science* 2012; 123:3781–8. <https://doi.org/10.1002/app.34870>.

[23] Nkurunziza G, Debaiky A, Cousin P, Benmokrane B. Durability of GFRP bars: A critical review of the literature. *Progress in Structural Engineering and Materials* 2005; 7:194–209. <https://doi.org/10.1002/pse.205>.

[24] Benzarti K, Colin X. Understanding the durability of advanced fibre-reinforced polymer (FRP) composites for structural applications. *Advanced Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications*, Elsevier Ltd; 2013, p. 361–439. <https://doi.org/10.1533/9780857098641.3.361>.

[25] Jones FR. Durability of reinforced plastics in liquid environments. *Reinforced Plastics Durability*, Elsevier; 1999, p. 70–110. <https://doi.org/10.1533/9781845694876.70>.

[26] Antoon MK, Koenig JL. The Structure and Moisture Stability of the Matrix Phase in Glass-Reinforced Epoxy Composites. *Journal of Macromolecular Science, Part C* 1980;19:135–73. <https://doi.org/10.1080/00222358008081048>.

[27] Guo B, Liu X, Tan X. Chapter 20 - Gas Hydrate Control. *Petroleum Production Engineering* (Second Edition), Gulf Professional Publishing; 2017, p. 649–62.

[28] Rackley SA. Chapter 17 - Units, Acronyms, and Glossary. In: Rackley SA, editor. *Carbon Capture and Storage*, 2010, p. 353–372.

[29] Chin JW, Nguyen T, Aouadi K. Sorption and Diffusion of Water, Salt Water, and Concrete Pore Solution in Composite Matrices. *Journal of Applied Polymer Science* 1999; 71:483–92.

[30] Ghorbel I, Valentin D. Hydrothermal Effects on the Physico-Chemical Properties of Pure and Glass Fiber Reinforced Polyester and Vinylester Resins. *Polymer Composites* 1993; 14:324–34.

[31] Apicella A, Migliaresi C, Nicolais L, Iaccarino L, Roccotelli S. The water ageing of unsaturated polyester-based composites: influence of resin chemical structure. *Composites* 1983; 14:387–92.

[32] Chin JW, Aouadi K, Haight MR, Hughes WL, Nguyen T. Effects of Water, Salt Solution and Simulated Concrete Pore Solution on the Properties of Composite Matrix Resins Used in Civil Engineering Applications. *Polymer Composites* 2001; 22:282–97.

[33] Cabral-Fonseca S, Correia JR, Rodrigues MP, Branco FA. Artificial accelerated ageing of GFRP pultruded profiles made of polyester and vinylester resins: Characterisation of physical-chemical and mechanical damage. *Strain* 2012; 48:162–73. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2011.00810.x>.

[34] Apicella A, Migliaresi C, Nicodemo L, Nicolais L, Iaccarino L, Roccotelli S. Water sorption and mechanical properties of a glass-reinforced polyester resin. *Composites* 1982;406–10.

[35] Schmitz GK, Metcalfe AG. Stress Corrosion of E-Glass Fiber. *I & EC Product Research and Development* 1966; 5:1–8.

[36] Charles RJ. Static fatigue of glass. *Journal of Applied Physics* 1958; 29:1549–53. <https://doi.org/10.1063/1.1722991>.

[37] Bascom WD. The surface chemistry of moisture-induced composite failure. *Interfaces in Polymer Matrix Composites*, vol. 6, New York: Academic Press; 1974, p. 79–108.

[38] Dutta PK, Hui D. Low-temperature and freeze-thaw durability of thick composites. *Composites: Part B* 1996; 27:371–9.

[39] Moussa O, Vassilopoulos AP, Keller T. Effects of low-temperature curing on physical behavior of cold-curing epoxy adhesives in bridge construction. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 2012; 32:15–22. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2011.09.001>.

[40] Feng P, Wang J, Tian Y, Loughery D, Wang Y. Mechanical Behavior and Design of FRP Structural Members at High and Low Service Temperatures. *Journal of Composites for Construction* 2016; 20:04016021. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000676](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000676).

[41] Piyush Dutta BK. Structural fiber composite materials for cold regions. *Journal of Cold Regions Engineering* 1988; 2:124–34.

[42] Sousa JM, Correia JR, Cabral-Fonseca S, Diogo AC. Effects of thermal cycles on the mechanical response of pultruded GFRP profiles used in civil engineering applications. *Composite Structures* 2014; 116:720–31. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.06.008>.

[43] Sápi Z, Butler R. Properties of cryogenic and low temperature composite materials – A review. *Cryogenics* 2020; 111:1–18. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2020.103190>.

[44] Wu H-C, Fu; Gongkang, Ronald; Gibson F, Yan A, Warnemuende K, et al. Durability of FRP Composite Bridge Deck Materials under Freeze-Thaw and Low Temperature Conditions. *Journal of Bridge Engineering* 2006; 11:443–51. <https://doi.org/10.1061/ASCE1084-0702200611:4443>.

[45] Chin JW. Durability of composites exposed to ultraviolet radiation. *Durability of Composites for Civil Structural Applications*, 2007, p. 80–97. <https://doi.org/10.1533/9781845693565.1.80>.

[46] Garrido M, Sousa JM, Correia JR, Cabral-Fonseca S. Prediction of long-term performance and definition of a moisture conversion factor for the durability design of pultruded GFRP profiles under hygrothermal exposure. *Construction and Building Materials* 2022; 326:126856. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126856>.

[47] Bank LC, Gentry TR, Thompson BP, Russell JS. A model specification for FRP composites for civil engineering structures. *Construction and Building Materials*, vol. 17, 2003, p. 405–37. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(03\)00041-2](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(03)00041-2).

[48] CEN/TS 19101: 2022. Design of fibre-polymer composite structures n.d.

[49] Grammatikos SA, Zafari B, Evernden MC, Mottram JT, Mitchels JM. Moisture uptake characteristics of a pultruded fibre reinforced polymer flat sheet subjected to hot/wet aging. *Polymer Degradation and Stability* 2015; 121:407–19. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2015.10.001>.

[50] Yang S, Liu W, Fang Y, Huo R. Influence of hygrothermal aging on the durability and interfacial performance of pultruded glass fiber-reinforced polymer composites. *Journal of Materials Science* 2019; 54:2102–21. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2944-6>.

[51] Carra G, Carvelli V. Long-term bending performance and service life prediction of pultruded glass fibre reinforced polymer composites. *Composite Structures* 2015; 127:308–15. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.03.049>.

[52] Correia JR, Cabral-Fonseca S, Branco FA, Ferreira JG, Eusébio MI, Rodrigues MP. Durability of pultruded glass-fiber-reinforced polyester profiles for structural applications. *Mechanics of Composite Materials* 2006; 42:325–38.

[53] Chu W, Wu L, Karbhari VM. Durability evaluation of moderate temperature cured E-glass/vinylester systems. *Composite Structures* 2004; 66:367–76. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2004.04.058>.

[54] Liao K, Schultheisz CR, Hunston DL. Effects of environmental aging on the properties of pultruded GFRP. *Composites Part B: engineering* 1999; 30:485–93.

[55] Lopez-Anido R, Harik I, Dutta P, Shahrooz B. Field performance evaluation of multiple fibre-reinforced polymer bridge deck systems over existing girders - Phase I, Final report. USA: 2001.

[56] Bazli M, Ashrafi H, Oskouei AV. Effect of harsh environments on mechanical properties of GFRP pultruded profiles. *Composites Part B: engineering* 2016; 99:203–15. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.019>.

[57] Gomez J, Casto B. Freeze-thaw durability of composite materials. *Proceedings of 1st International Conference on Composites in Infrastructure*, Virginia: 1996.

[58] Karbhari VM. Durability of advanced polymer composites in the civil infrastructure. In: Hollaway LC, editor., Woodhead Publishing; 2004, p. 31–8.

[59] Svetlik SL. An investigation in the hygrothermal degradation of an E-glass/vinyl-ester composite in humid and immersion environments. PhD Thesis. University of California, 2008.

[60] Element Materials Technology (EMT). Evaluation of mechanical properties of the vinyl ester and poly ester composite materials aged in seawater. Report C3817-1_RevB, Report for Fiber Glass Systems, 2015.

[61] Wind Turbine Materials and Constructions (WMC). Tests on materials from the Spieringsluis. Overview Report, Internal report by Royal HaskoningDHV for the Ministry of Infrastructure and Water Management, the Netherlands, 2013.

[62] Wind Turbine Materials and Constructions (WMC). Tests on materials from the Spieringsluis – New reference. Overview Report, Internal report by Royal HaskoningDHV for the Ministry of Infrastructure and Water Management, the Netherlands, 2014.

[63] Karbhari VM. E-Glass/vinylester composites in aqueous environments: effects on short-beam shear strength. *Journal of Composites for Construction* 2004; 8:148–56. <https://doi.org/10.1061/ASCE1090-026820048:2148>.

[64] BÜV Guideline. Structural Polymer Components for Building and Construction. Draft, Dimensioning and Construction, 2014.

[65] American Society of Civil Engineers (ASCE). Pre-Standard for Load & Resistance Factor Design (LRFD) of Pultruded Fiber Reinforced Polymer (FRP) Structures. ASCE, Reston, VA: 2010.

[66] CUR 96. Fiber-Reinforced Plastics in Structural and Civil Engineering Support Structures, SBRCURnet Committee 1850 (Dutch Recommendation), 2019.

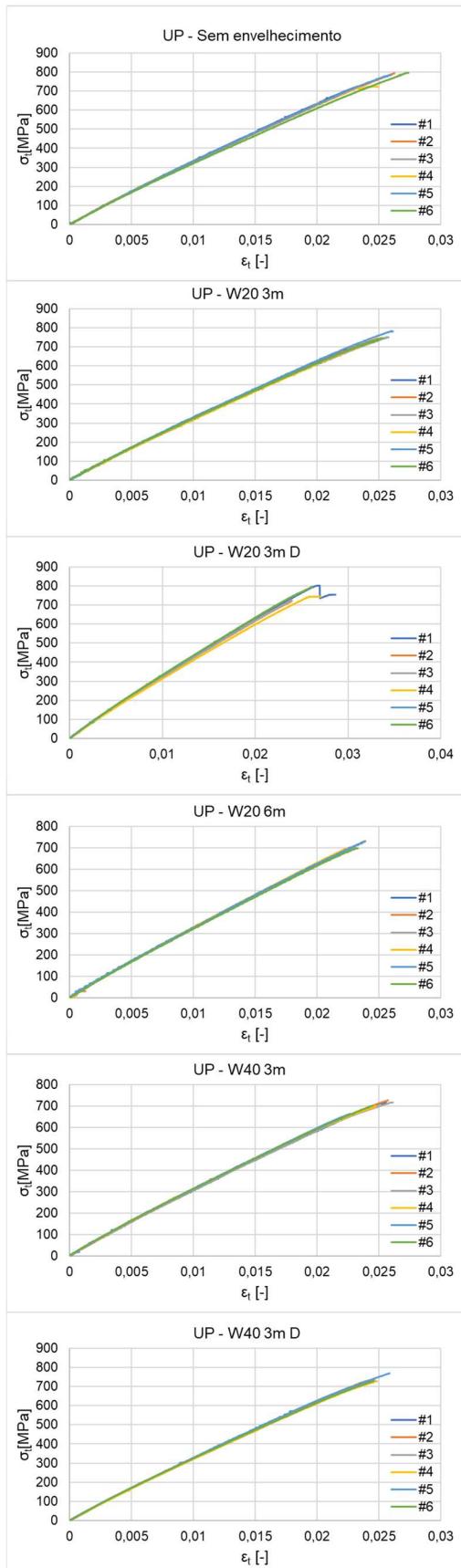
[67] METYX Composites. Technical Datasheet: Q850E10E - QUADRIAXIAL E GLASS. Tuzla: n.d.

[68] METYX Composites. Technical Datasheet: L600E10C - UNIDIRECTIONAL E GLASS FABRIC. Tuzla: n.d.

[69] Technical Datasheet: Polyt Composites. POLYLITE® 720-691 2019.

- [70] Technical Datasheet: INEOS Composites. DERAKANETM MOMENTUM 411-200 Epoxy Vinyl Ester Resin 2020.
- [71] Technical Datasheet: Instron. 5980 Series - Dual Column Floor Model 2018.
- [72] ISO 527-4 - Determination of tensile properties - Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced composites. Geneve, Switzerland: 1997.
- [73] ISO 527-1 Plastics-Determination of tensile properties. Geneve, Switzerland: 2012.
- [74] UNE-EN ISO 14126: Determinación de las propiedades de compresión en dirección paralela al plano de laminación. Madrid, Geneve, Switzerland: 1999.
- [75] ASTM D5379-12 - Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method 1. West Conshohocken, Pennsylvania, USA: 2019.
https://doi.org/10.1520/D5379_D5379M-12.
- [76] ISO 14130 - Fibre-reinforced plastic composites - Determination of apparent laminar shear strength by short-beam method. Geneve, Switzerland: 1998.
- [77] ISO 14125 - Fibre-reinforced plastic composites – Determination of flexural properties. Geneve, Switzerland: 1998.
- [78] Morgado T, Nunes F, Correia JR, Branco F. Fire Protection Systems for Glass Fibre Reinforced Polymer (GFRP) Pultruded Profiles - Dynamic Mechanical Analysis (DMA). Report IST-2-1 Lisboa: 2013.
- [79] ASTM D7028 - Standard Test Method for Glass Transition Temperature (DMA Tg) of Polymer Matrix Composites by Dynamic Mechanical Analysis (DMA). West Conshohocken, Pennsylvania, USA: 2007.
- [80] Karbhari VM. Dynamic mechanical analysis of the effect of water on E-glass-vinylester composites. Journal of Reinforced Plastics and Composites 2006; 25:631–44.
<https://doi.org/10.1177/0731684406058274>.

Anexo A – Provetes de GFRP com poliéster insaturado (UP)



a)

b)

c)

d)

e)

f)

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	734,5	34,4
#2	795,6	34,1
#3	-	-
#4	722,9	34,2
#5	785,3	34,4
#6	795,5	33,2
Média	766,8	34,1
Desv.Pad.	31,5	0,4
CoV	4%	1%

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	733,7	33,8
#2	744,3	33,1
#3	751,0	32,5
#4	744,7	33,0
#5	783,2	33,6
#6	745,6	33,0
Média	750,4	33,2
Desv.Pad.	15,5	0,4
CoV	2%	1%

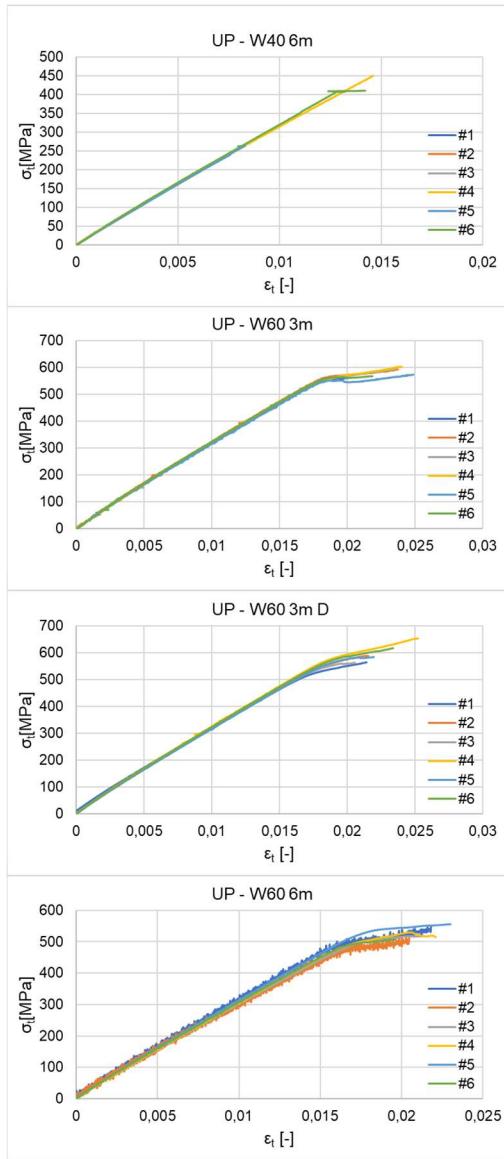
Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	802,0	34,4
#2	721,3	33,6
#3	724,1	33,4
#4	745,0	32,5
#5	759,2	33,9
#6	796,8	34,6
Média	758,1	33,7
Desv.Pad.	31,9	0,7
CoV	4%	2%

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	701,5	33,7
#2	731,5	34,1
#3	703,4	33,4
#4	698,7	33,5
#5	728,6	32,6
#6	698,2	33,1
Média	710,3	33,4
Desv.Pad.	14,1	0,5
CoV	2%	1%

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	719,4	31,5
#2	726,9	31,8
#3	716,8	30,5
#4	700,4	32,2
#5	663,8	32,3
#6	701,5	31,8
Média	704,8	31,7
Desv.Pad.	20,7	0,6
CoV	3%	2%

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	726,2	33,6
#2	730,7	33,7
#3	734,4	33,2
#4	728,7	33,1
#5	769,6	33,3
#6	729,5	33,8
Média	736,5	33,4
Desv.Pad.	15,0	0,3
CoV	2%	1%

Figura A.1 – Curvas de tensão vs. deformação do ensaio tração e respetivos valores obtidos dos provetes: a) sem envelhecimento; b) W20 3m; c) W20 3m D; d) W20 6m; e) W40 3m; f) W40 3m D.



a)

b)

c)

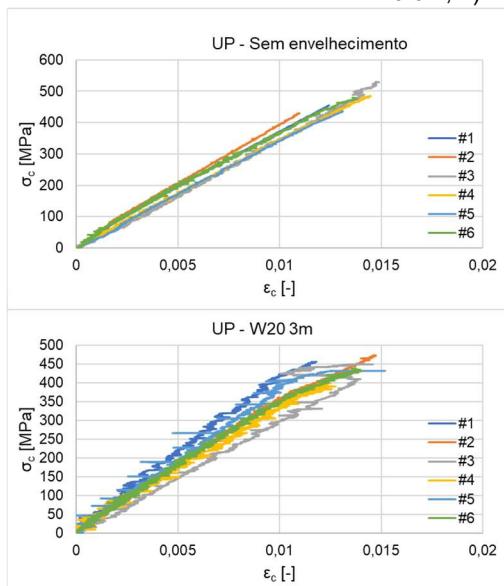
d)

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	-	-
#2	-	-
#3	704,9	32,0
#4	705,8	32,9
#5	670,9	32,3
#6	695,7	32,4
Média	694,3	32,4
Desv. Pad.	14,1	0,3
CoV	2%	1%

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	560,7	32,8
#2	593,0	34,0
#3	590,6	32,6
#4	602,6	32,6
#5	573,1	32,2
#6	567,4	33,4
Média	581,2	32,9
Desv. Pad.	15,1	0,6
CoV	3%	2%

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	563,9	31,4
#2	588,6	32,4
#3	562,6	32,2
#4	652,6	32,9
#5	583,8	32,1
#6	616,9	33,0
Média	594,7	32,3
Desv. Pad.	31,6	0,5
CoV	5%	2%

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	561,6	31,2
#2	509,7	29,7
#3	518,1	30,5
#4	530,0	31,1
#5	555,5	30,9
#6	506,7	31,9
Média	530,3	30,9
Desv. Pad.	21,4	0,7
CoV	4%	2%



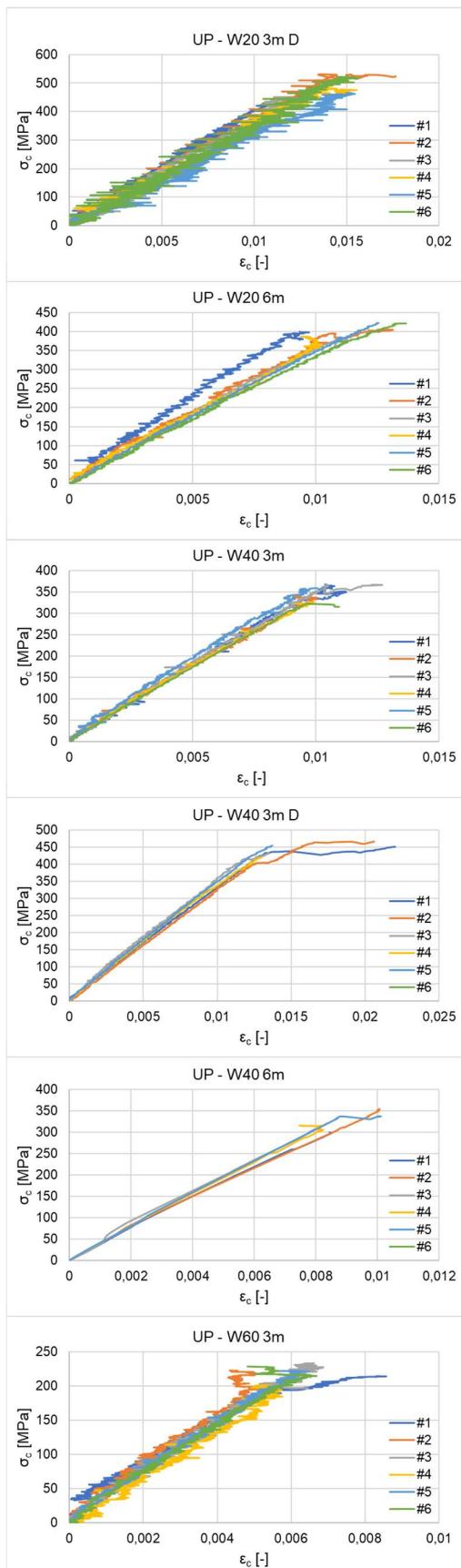
a)

b)

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	455,3	38,3
#2	429,9	40,6
#3	530,1	32,5
#4	484,6	34,3
#5	436,3	37,3
#6	479,2	38,0
Média	469,2	36,8
Desv. Pad.	33,8	2,7
CoV	7%	7%

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	455,8	42,1
#2	473,2	35,2
#3	449,0	31,2
#4	401,4	29,5
#5	431,7	37,8
#6	437,0	35,6
Média	441,3	35,3
Desv. Pad.	22,3	4,1
CoV	5%	12%

Figura A.3 – Curvas de tensão vs. deformação do ensaio à compressão e respetivos valores obtidos dos provetes: a) sem envelhecimento; b) W20 3m.



a)

b)

c)

d)

e)

f)

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	460,4	39,3
#2	529,6	39,1
#3	451,5	37,8
#4	485,8	29,9
#5	465,4	28,0
#6	521,5	32,5
Média	485,7	34,4
Desv.Pad.	30,1	4,5
CoV	6%	13%

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	399,6	42,0
#2	404,9	34,5
#3	379,0	36,8
#4	387,0	34,7
#5	422,6	35,3
#6	421,5	34,3
Média	402,4	36,3
Desv.Pad.	16,2	2,7
CoV	4%	7%

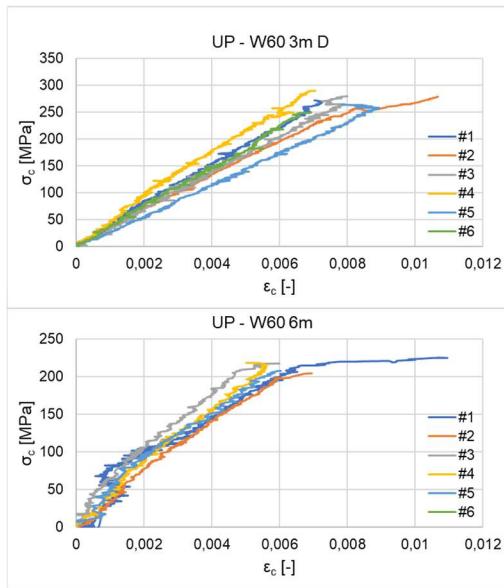
Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	367,5	35,8
#2	343,9	34,2
#3	366,9	37,3
#4	328,0	40,1
#5	362,1	37,3
#6	322,2	34,0
Média	348,4	36,4
Desv.Pad.	18,3	2,1
CoV	5%	6%

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	450,8	33,4
#2	465,9	32,9
#3	432,4	36,2
#4	420,0	34,6
#5	454,5	35,6
#6	-	-
Média	444,8	34,5
Desv.Pad.	16,4	1,3
CoV	4%	4%

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	287,3	36,6
#2	357,8	-
#3	321,3	37,5
#4	316,2	37,9
#5	348,5	38,9
#6	-	-
Média	326,2	37,7
Desv.Pad.	25,0	0,8
CoV	8%	2%

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	214,3	31,7
#2	222,8	40,9
#3	233,1	35,0
#4	201,0	33,9
#5	221,7	34,9
#6	228,6	34,4
Média	220,2	35,1
Desv.Pad.	10,4	2,8
CoV	5%	8%

Figura A.4 – Curvas de tensão vs. deformação do ensaio à compressão e respetivos valores obtidos dos provetes: a) W20 3m D; b) W20 6m; c) W40 3m; d) W40 3m D; e) W40 6m; f) W60 3m.



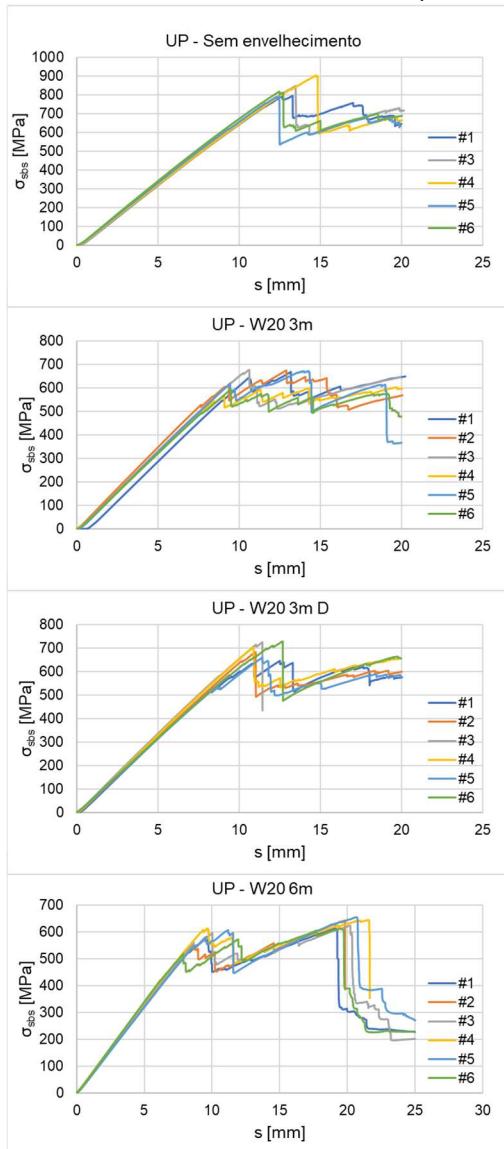
a)

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	271,8	36,8
#2	278,6	32,1
#3	279,7	34,6
#4	289,3	41,8
#5	263,4	29,1
#6	248,9	34,6
Média	271,9	34,8
Desv. Pad.	13,0	3,9
CoV	5%	11%

b)

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	225,2	28,7
#2	204,3	33,5
#3	217,3	36,2
#4	218,2	35,4
#5	207,7	30,6
#6	-	-
Média	214,5	32,9
Desv. Pad.	7,6	2,9
CoV	4%	9%

Figura A.5 – Curvas de tensão vs. deformação do ensaio à compressão e respetivos valores obtidos dos provetes: a) W60 3m D; b) W60 6m.



a)

Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	794,7
#2	-
#3	847,3
#4	903,6
#5	790,1
#6	817,7
Média	830,7
Desv. Pad.	41,7
CoV	5%

b)

Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	668,4
#2	674,3
#3	677,0
#4	602,7
#5	672,5
#6	593,4
Média	648,0
Desv. Pad.	35,6
CoV	5%

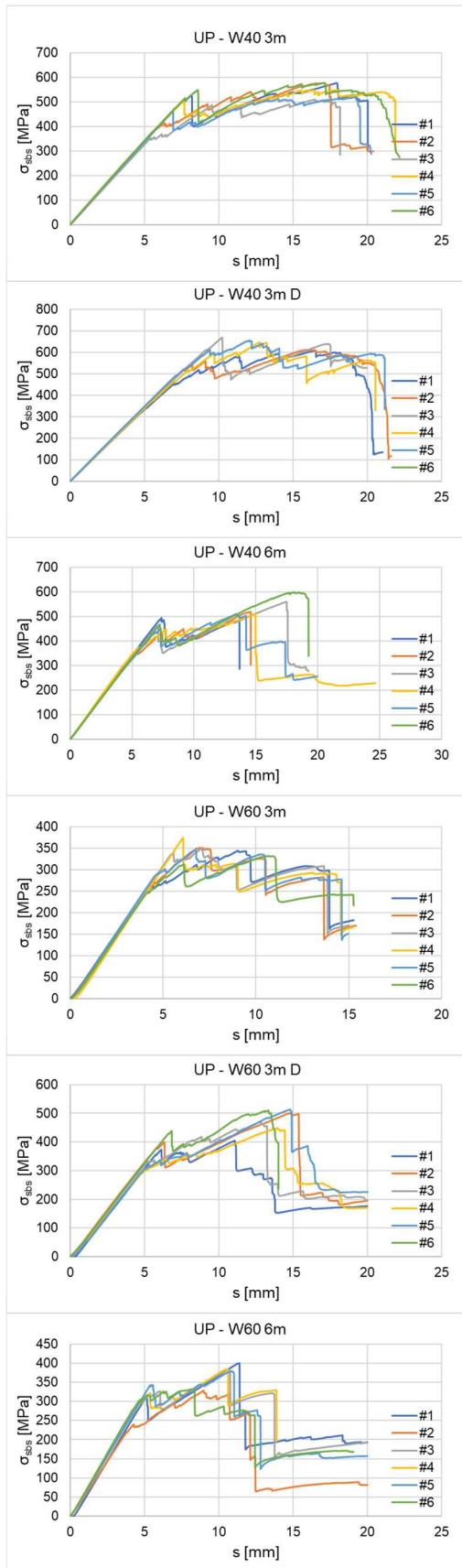
c)

Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	645,5
#2	683,3
#3	724,7
#4	701,9
#5	660,0
#6	728,4
Média	690,6
Desv. Pad.	30,9
CoV	4%

d)

Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	613,0
#2	642,6
#3	623,5
#4	644,0
#5	654,9
#6	612,2
Média	631,7
Desv. Pad.	16,4
CoV	3%

Figura A.6 – Curvas de tensão vs. deslocamento a meio vão do ensaio flexão e respetivos valores obtidos dos provetes: a) sem envelhecimento; b) W20 3m; c) W20 3m D; d) W20 6m.



a)

b)

c)

d)

e)

f)

Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	576,8
#2	576,6
#3	510,2
#4	548,9
#5	520,0
#6	577,5
Média	551,7
Desv.Pad.	27,8
CoV	5%

Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	607,6
#2	612,0
#3	669,3
#4	647,2
#5	655,5
#6	-
Média	638,3
Desv.Pad.	24,4
CoV	4%

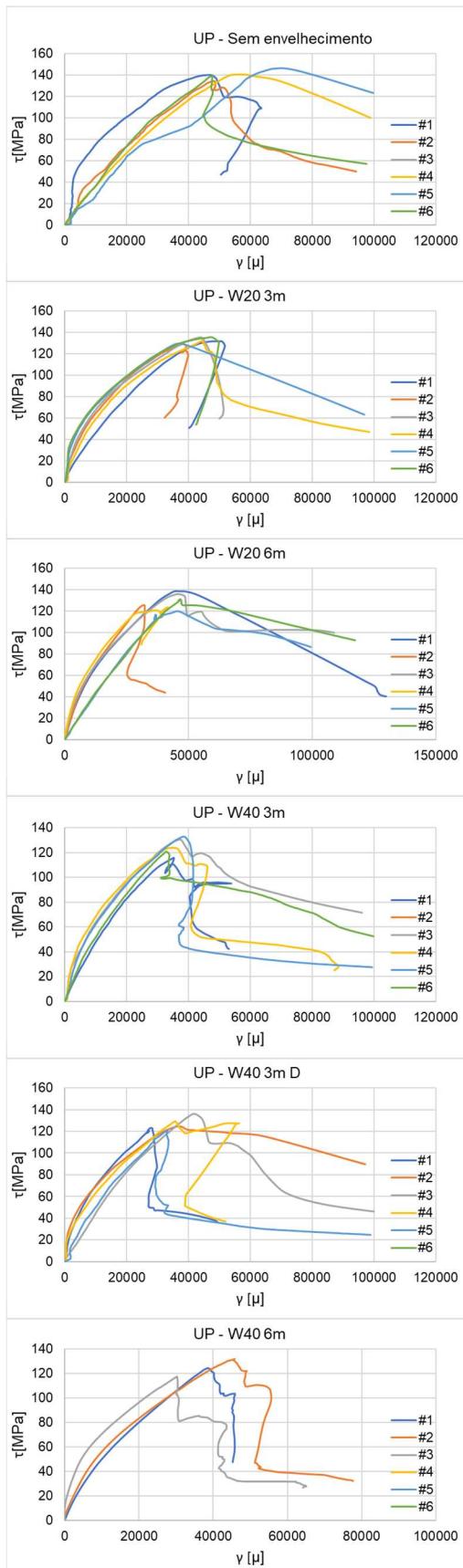
Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	493,9
#2	518,2
#3	558,9
#4	508,8
#5	510,1
#6	598,3
Média	531,4
Desv.Pad.	36,0
CoV	7%

Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	344,2
#2	351,3
#3	350,2
#4	374,4
#5	345,0
#6	331,8
Média	349,5
Desv.Pad.	12,8
CoV	4%

Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	404,8
#2	501,7
#3	469,6
#4	448,4
#5	513,4
#6	510,2
Média	474,7
Desv.Pad.	38,9
CoV	8%

Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	400,2
#2	328,5
#3	383,5
#4	383,8
#5	378,9
#6	332,0
Média	367,8
Desv.Pad.	27,4
CoV	7%

Figura A.7 – Curvas de tensão vs. deslocamento a meio vão do ensaio flexão e respetivos valores obtidos dos provetes: a) W40 3m; b) W40 3m D; c) W40 6m; d) W60 3m; e) W60 3m D; f) W60 6m.



a)

b)

c)

d)

e)

f)

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	142,4	2,9
#2	137,0	2,9
#3	-	-
#4	144,6	3,1
#5	148,6	3,4
#6	141,0	3,6
Média	142,7	3,2
Desv.Pad.	3,8	0,3
CoV	3%	9%

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	132,0	3,5
#2	131,4	3,5
#3	137,1	3,3
#4	133,5	3,6
#5	132,0	3,0
#6	136,3	3,0
Média	133,7	3,3
Desv.Pad.	2,2	0,3
CoV	2%	8%

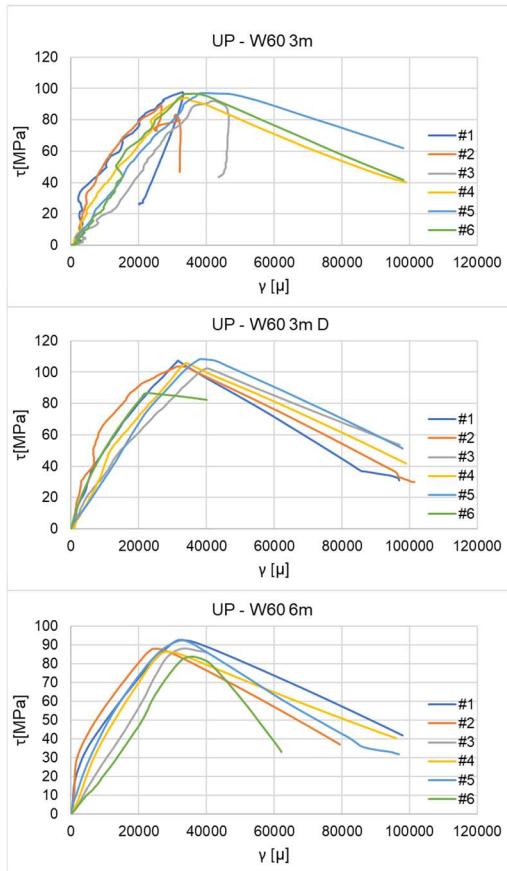
Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	141,3	3,5
#2	126,6	3,7
#3	136,7	3,3
#4	124,6	3,5
#5	121,0	3,3
#6	132,9	3,2
Média	130,5	3,4
Desv.Pad.	7,1	0,2
CoV	5%	5%

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	118,2	3,8
#2	-	-
#3	132,4	3,6
#4	125,1	3,3
#5	135,1	3,5
#6	123,5	3,7
Média	126,9	3,6
Desv.Pad.	6,1	0,2
CoV	5%	5%

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	123,8	3,7
#2	126,1	3,0
#3	137,7	4,1
#4	131,7	3,4
#5	122,6	3,8
#6	-	-
Média	128,4	3,6
Desv.Pad.	5,6	0,4
CoV	4%	11%

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	124,4	3,3
#2	131,7	3,1
#3	117,5	2,8
#4	-	-
#5	-	-
#6	-	-
Média	124,5	3,1
Desv.Pad.	5,8	0,2
CoV	5%	7%

Figura A.8 – Curvas de tensão vs. deformação por corte no plano e respetivos valores obtidos dos provetes: a) sem envelhecimento; b) W20 3m; c) W20 6m; d) W40 3m; e) W40 3m D; f) W40 6m.



a)

b)

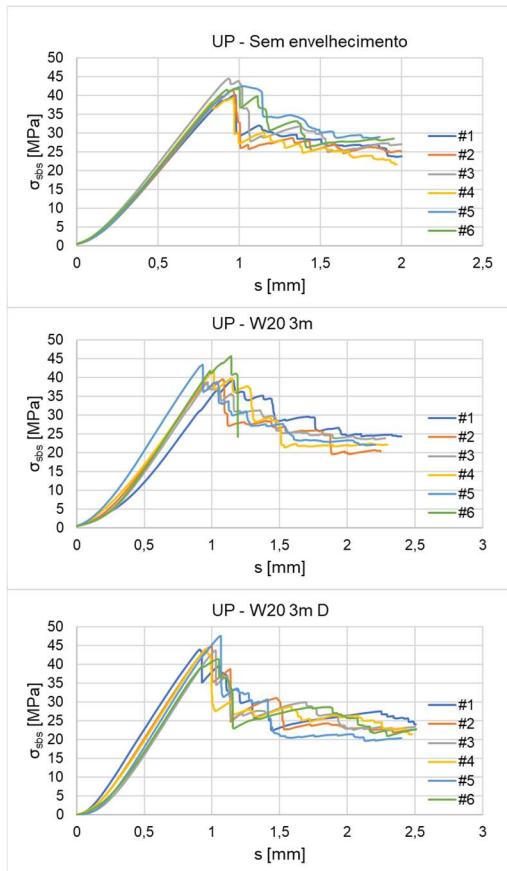
c)

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	98,7	2,7
#2	91,3	3,0
#3	92,5	2,3
#4	94,8	2,6
#5	98,0	2,9
#6	97,7	4,1
Média	95,5	2,9
Desv. Pad.	2,9	0,6
CoV	3%	19%

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	112,3	3,2
#2	106,5	3,6
#3	103,4	2,8
#4	110,0	3,8
#5	112,9	3,4
#6	115,1	3,4
Média	110,0	3,4
Desv. Pad.	4,0	0,3
CoV	4%	9%

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	95,3	2,4
#2	90,9	2,5
#3	89,0	2,8
#4	87,3	3,1
#5	93,2	3,1
#6	85,6	2,5
Média	90,2	2,7
Desv. Pad.	3,3	0,3
CoV	4%	11%

Figura A.9 – Curvas de tensão vs. deformação por corte no plano e respectivos valores obtidos dos provetes: a) W60 3m; b) W60 3m D; d) W60 6m.



a)

b)

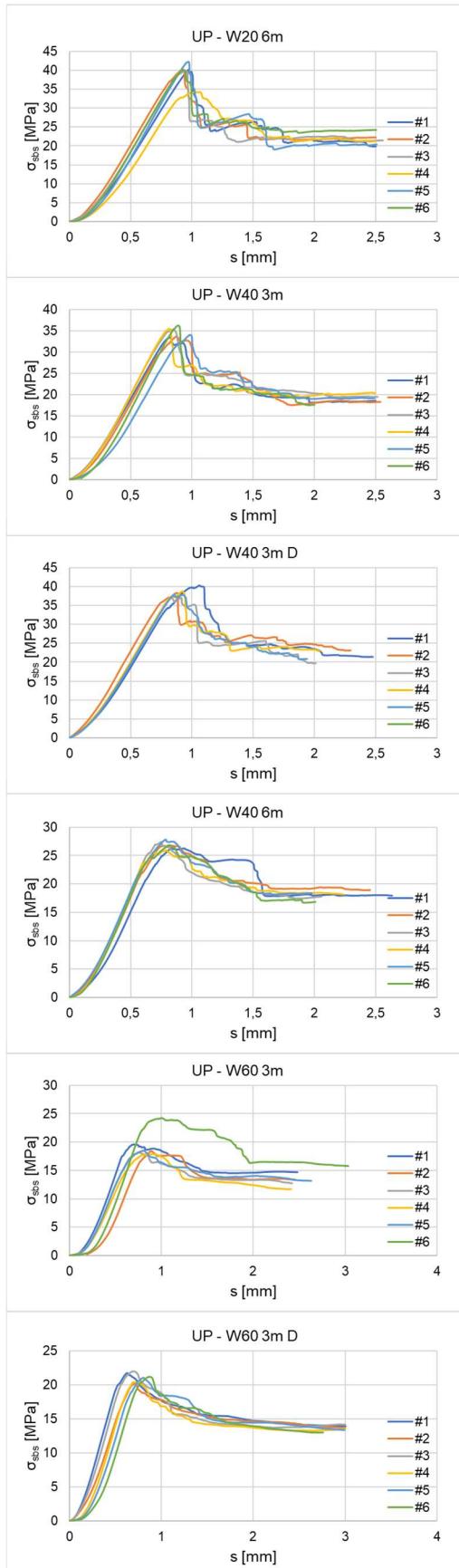
c)

Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	40,2
#2	41,3
#3	44,5
#4	39,4
#5	42,5
#6	41,9
Média	41,6
Desv. Pad.	1,6
CoV	4%

Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	39,2
#2	39,5
#3	38,8
#4	41,9
#5	43,4
#6	45,7
Média	41,4
Desv. Pad.	2,5
CoV	6%

Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	43,9
#2	44,7
#3	43,7
#4	44,1
#5	47,5
#6	41,4
Média	44,2
Desv. Pad.	1,8
CoV	4%

Figura A.10 – Curvas de tensão vs. deslocamento a meio vão do ensaio de corte interlaminar e respectivos valores obtidos dos provetes: a) sem envelhecimento; b) W20 3m; c) W20 3m D.



a)

b)

c)

d)

e)

f)

Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	40,2
#2	40,2
#3	39,9
#4	34,3
#5	42,3
#6	40,0
Média	39,5
Desv.Pad.	2,5
CoV	6%

Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	33,5
#2	33,7
#3	35,4
#4	35,5
#5	34,0
#6	36,2
Média	34,7
Desv.Pad.	1,0
CoV	3%

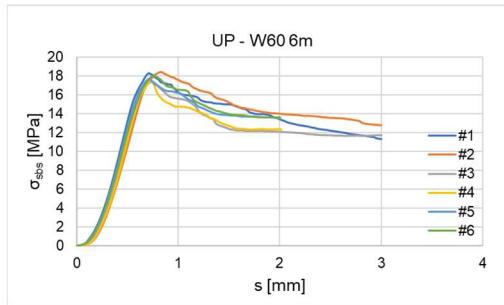
Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	40,3
#2	38,4
#3	37,2
#4	38,8
#5	38,0
#6	-
Média	38,5
Desv.Pad.	1,0
CoV	3%

Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	26,4
#2	26,8
#3	27,4
#4	26,0
#5	27,8
#6	26,8
Média	26,9
Desv.Pad.	0,6
CoV	2%

Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	19,6
#2	18,4
#3	18,2
#4	17,9
#5	18,5
#6	24,2
Média	19,5
Desv.Pad.	2,2
CoV	11%

Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	21,7
#2	20,2
#3	22,0
#4	20,4
#5	21,0
#6	21,2
Média	21,1
Desv.Pad.	0,6
CoV	3%

Figura A.11 – Curvas de tensão vs. deslocamento a meio vão do ensaio de corte interlaminar e respetivos valores obtidos dos provetes: a) W20 6m; b) W40 3m; c) W40 3m D; d) W40 6m; e) W60 3m; f) W60 3m D.

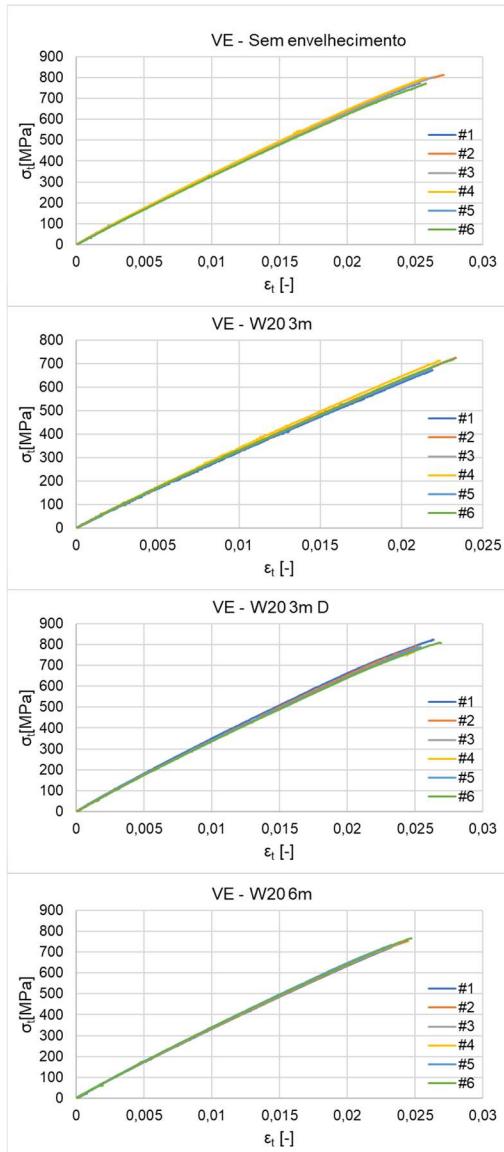


Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	18,3
#2	18,4
#3	17,4
#4	17,6
#5	17,7
#6	18,0
Média	17,9
Desv. Pad.	0,4
CoV	2%

a)

Figura A.12 – Curvas de tensão vs. deslocamento a meio vão do ensaio de corte interlaminar e respetivos valores obtidos dos provetes: a) W60 6m.

Anexo B – Provetes de GFRP com viniléster (VE)



Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	773,1	34,0
#2	812,1	34,2
#3	801,0	34,0
#4	800,0	34,4
#5	-	-
#6	771,8	33,3
Média	791,6	34,0
Desv. Pad.	16,2	0,4
CoV	2%	1%

a)

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	671,7	33,1
#2	725,6	33,9
#3	-	-
#4	712,9	34,2
#5	677,5	33,7
#6	719,9	33,7
Média	701,5	33,7
Desv. Pad.	22,4	0,4
CoV	3%	1%

b)

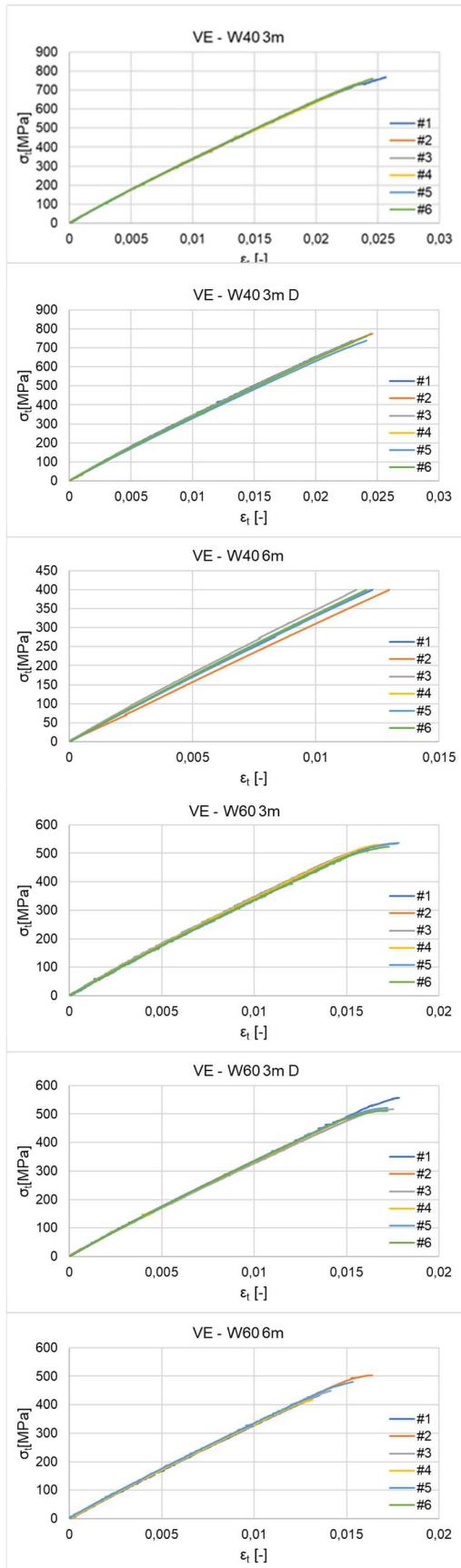
Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	823,6	35,5
#2	790,3	35,1
#3	-	-
#4	768,2	34,7
#5	787,2	35,2
#6	808,8	34,7
Média	795,6	35,1
Desv. Pad.	19,0	0,3
CoV	2%	1%

c)

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	722,8	33,9
#2	753,3	34,0
#3	739,5	34,1
#4	-	-
#5	735,0	34,6
#6	766,0	35,2
Média	743,3	34,4
Desv. Pad.	14,9	0,5
CoV	2%	1%

d)

Figura A.13 – Curvas de tensão vs. deformação do ensaio tração e respetivos valores obtidos dos provetes: a) sem envelhecimento; b) W20 3m; c) W20 3m D; d) W20 6m.



a)

b)

c)

d)

e)

f)

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	767,9	34,9
#2	741,9	34,3
#3	731,3	34,9
#4	739,8	34,7
#5	750,1	35,0
#6	759,6	34,6
Média	748,4	34,7
Desv.Pad.	12,4	0,3
CoV	2%	1%

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	737,1	35,6
#2	774,8	35,3
#3	740,1	34,8
#4	727,7	34,8
#5	738,8	33,8
#6	761,6	34,7
Média	746,7	34,8
Desv.Pad.	16,2	0,6
CoV	2%	2%

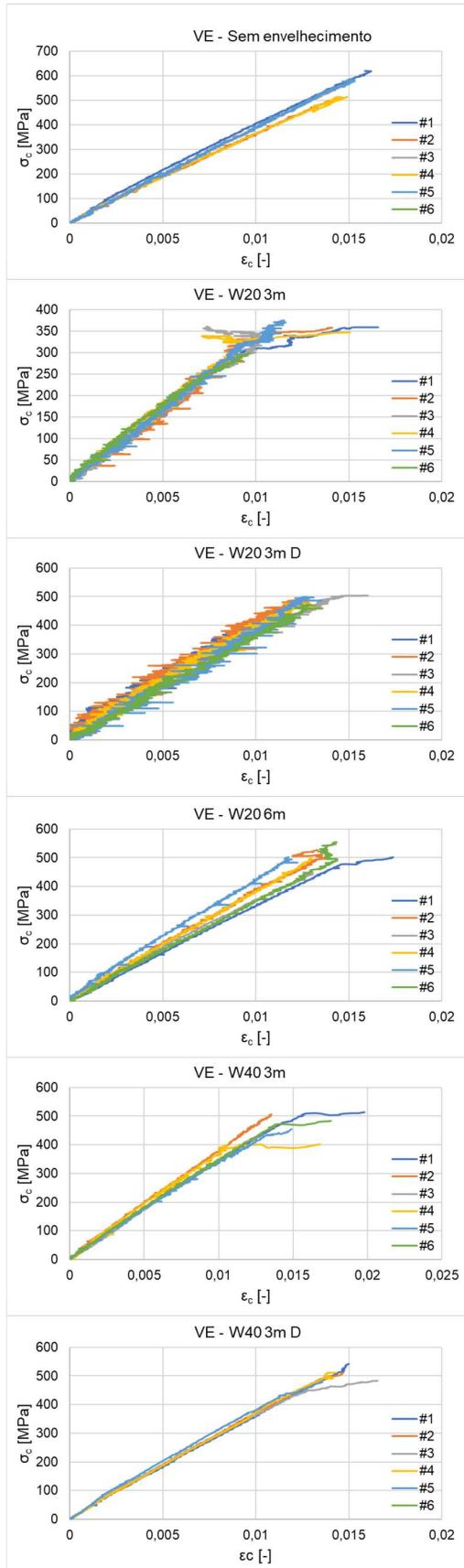
Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	772,9	33,2
#2	725,3	31,4
#3	730,1	35,2
#4	705,7	31,0
#5	743,3	33,8
#6	736,4	34,4
Média	735,6	33,2
Desv.Pad.	20,3	1,5
CoV	3%	5%

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	502,8	35,4
#2	513,3	35,0
#3	537,0	35,6
#4	530,8	35,3
#5	534,5	34,7
#6	523,3	34,8
Média	523,6	35,1
Desv.Pad.	12,2	0,3
CoV	2%	1%

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	557,2	34,4
#2	508,6	33,4
#3	517,4	33,4
#4	503,5	34,2
#5	522,1	34,3
#6	511,0	34,4
Média	520,0	34,0
Desv.Pad.	17,7	0,4
CoV	3%	1%

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	434,0	33,9
#2	503,6	34,0
#3	449,8	33,8
#4	416,8	33,8
#5	480,1	33,9
#6	-	-
Média	456,9	33,9
Desv.Pad.	31,3	0,1
CoV	7%	0%

Figura A.14 – Curvas de tensão vs. deformação do ensaio tração e respetivos valores obtidos dos provetes: a) W40 3m; b) W40 3m D; c) W40 6m; d) W60 3m; e) W60 3m D; f) W60 6m.



a)

b)

c)

d)

e)

f)

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	619,0	42,2
#2	498,8	37,5
#3	560,1	39,1
#4	514,4	36,5
#5	584,9	40,6
#6	-	-
Média	555,4	39,2
Desv.Pad.	44,3	2,0
CoV	8%	5%

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	358,9	34,4
#2	358,2	29,1
#3	360,6	35,5
#4	347,0	35,1
#5	374,5	32,5
#6	298,6	34,6
Média	349,6	33,6
Desv.Pad.	24,2	2,2
CoV	7%	7%

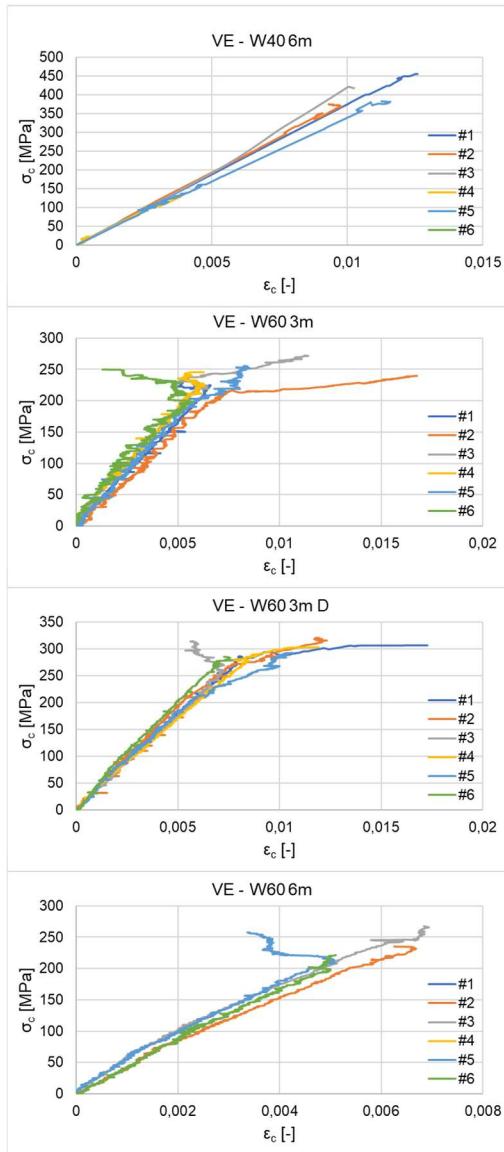
Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	416,0	36,9
#2	487,3	39,2
#3	503,8	37,4
#4	480,5	38,4
#5	498,6	38,9
#6	472,2	38,5
Média	476,4	38,2
Desv.Pad.	29,0	0,8
CoV	6%	2%

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	501,9	34,8
#2	527,3	38,6
#3	449,2	35,0
#4	497,8	37,7
#5	502,1	41,8
#6	554,9	35,6
Média	505,5	37,2
Desv.Pad.	32,1	2,5
CoV	6%	7%

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	513,7	35,0
#2	506,8	37,5
#3	438,6	36,0
#4	402,1	38,1
#5	454,8	34,5
#6	484,0	36,0
Média	466,7	36,2
Desv.Pad.	39,2	1,2
CoV	8%	3%

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	541,8	35,2
#2	511,1	37,5
#3	483,0	36,9
#4	511,6	35,9
#5	479,0	38,5
#6	-	-
Média	505,3	36,8
Desv.Pad.	22,8	1,2
CoV	5%	3%

Figura A.15 – Curvas de tensão vs. deformação do ensaio à compressão e respetivos valores obtidos dos provetes: a) Sem envelhecimento; b) W20 3m; c) W20 3m D; d) W20 6m; e) W40 3m; f) W40 3m D.



a)

b)

c)

d)

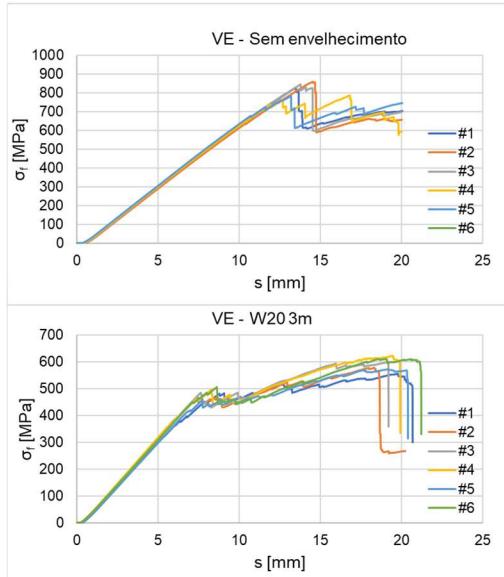
Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	354,4	37,8
#2	376,9	38,7
#3	373,8	38,2
#4	420,2	36,5
#5	384,5	33,2
#6	-	-
Média	382,0	36,9
Desv.Pad.	21,5	2,0
CoV	6%	5%

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	237,9	33,1
#2	239,8	31,8
#3	272,3	34,5
#4	245,5	33,8
#5	255,6	35,2
#6	249,8	36,7
Média	250,2	34,2
Desv.Pad.	11,6	1,5
CoV	5%	4%

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	306,4	35,1
#2	321,0	37,6
#3	314,1	34,9
#4	302,9	32,1
#5	292,4	34,4
#6	285,2	37,7
Média	303,7	35,3
Desv.Pad.	12,2	1,9
CoV	4%	5%

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	-	-
#2	235,0	35,4
#3	267,5	36,7
#4	-	-
#5	257,7	47,2
#6	221,5	40,4
Média	245,4	39,9
Desv.Pad.	18,2	4,6
CoV	7%	12%

Figura A.16 – Curvas de tensão vs. deformação do ensaio à compressão e respetivos valores obtidos dos provetes: a) W40 6m; b) W60 3m; c) W60 3m D; d) W60 6m.



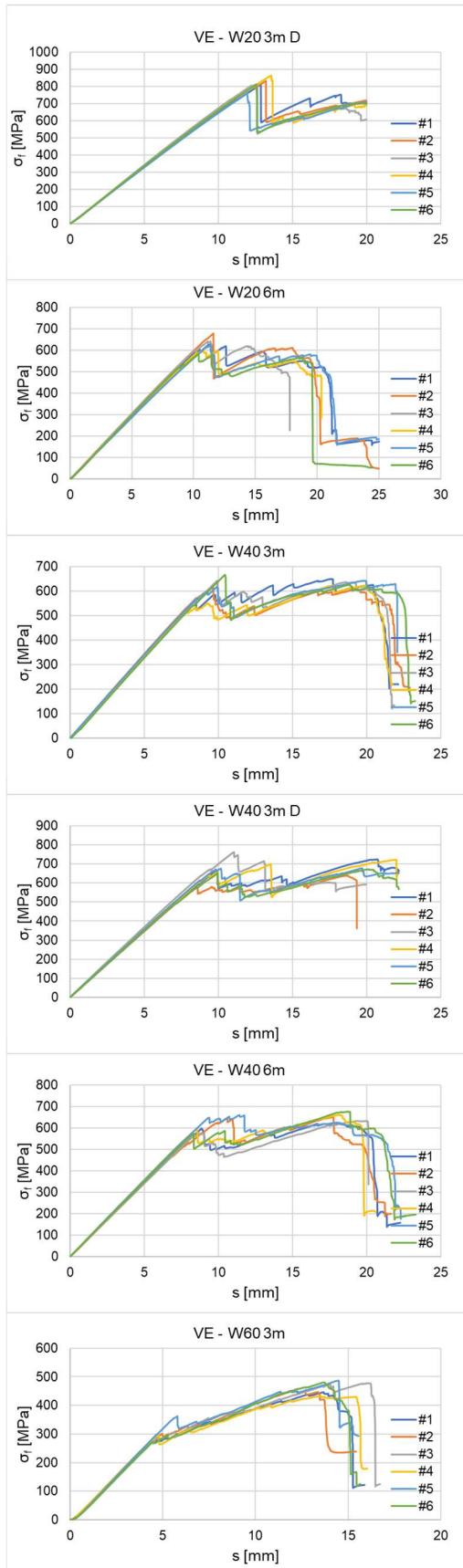
a)

b)

Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	825,7
#2	859,3
#3	844,6
#4	786,5
#5	783,1
#6	-
Média	819,8
Desv.Pad.	30,5
CoV	4%

Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	555,4
#2	577,9
#3	599,8
#4	622,5
#5	571,6
#6	610,2
Média	589,6
Desv.Pad.	23,2
CoV	4%

Figura A.17 – Curvas de tensão vs. deslocamento a meio vão do ensaio flexão e respetivos valores obtidos dos provetes: a) Sem envelhecimento; b) W20 3m.



a)

b)

c)

d)

e)

f)

Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	811,3
#2	831,6
#3	814,1
#4	862,8
#5	759,9
#6	811,6
Média	815,2
Desv.Pad.	30,6
CoV	4%

Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	628,2
#2	678,3
#3	641,7
#4	598,9
#5	625,0
#6	583,8
Média	626,0
Desv.Pad.	30,3
CoV	5%

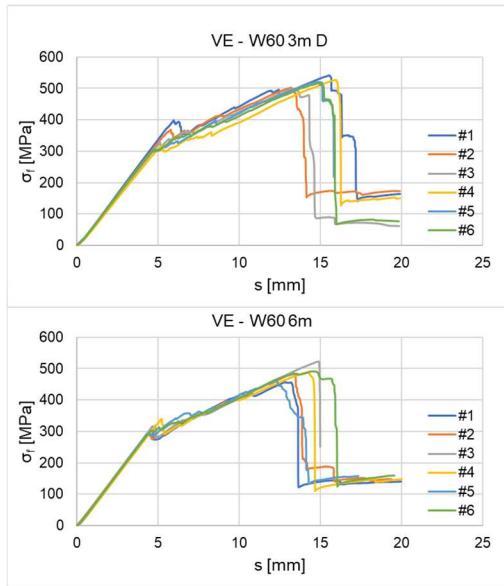
Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	649,8
#2	613,3
#3	642,7
#4	622,2
#5	642,3
#6	666,1
Média	639,4
Desv.Pad.	17,4
CoV	3%

Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	724,0
#2	638,0
#3	762,7
#4	721,7
#5	677,4
#6	671,8
Média	699,3
Desv.Pad.	41,1
CoV	6%

Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	624,3
#2	650,1
#3	632,4
#4	661,5
#5	660,1
#6	676,7
Média	650,8
Desv.Pad.	17,9
CoV	3%

Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	446,3
#2	450,6
#3	477,8
#4	432,6
#5	487,3
#6	480,6
Média	462,5
Desv.Pad.	20,3
CoV	4%

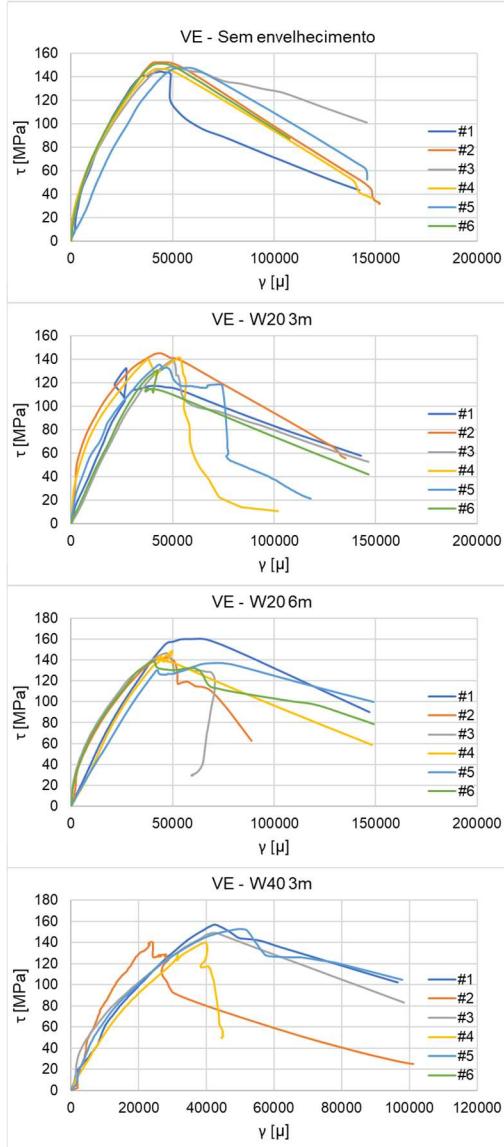
Figura A.18 – Curvas de tensão vs. deslocamento a meio vão do ensaio flexão e respetivos valores obtidos dos provetes: a) W20 3m D; b) W20 6m; c) W40 3m; d) W40 3m D; e) W40 6m; f) W60 3m.



a)

Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	541,8
#2	502,6
#3	499,0
#4	527,3
#5	521,1
#6	517,9
Média	518,3
Desv.Pad.	14,5
CoV	3%

Figura A.19 – Curvas de tensão vs. deslocamento a meio vão do ensaio flexão e respetivos valores obtidos dos provetes: a) W60 3m D; b) W60 6m.



a)

b)

c)

d)

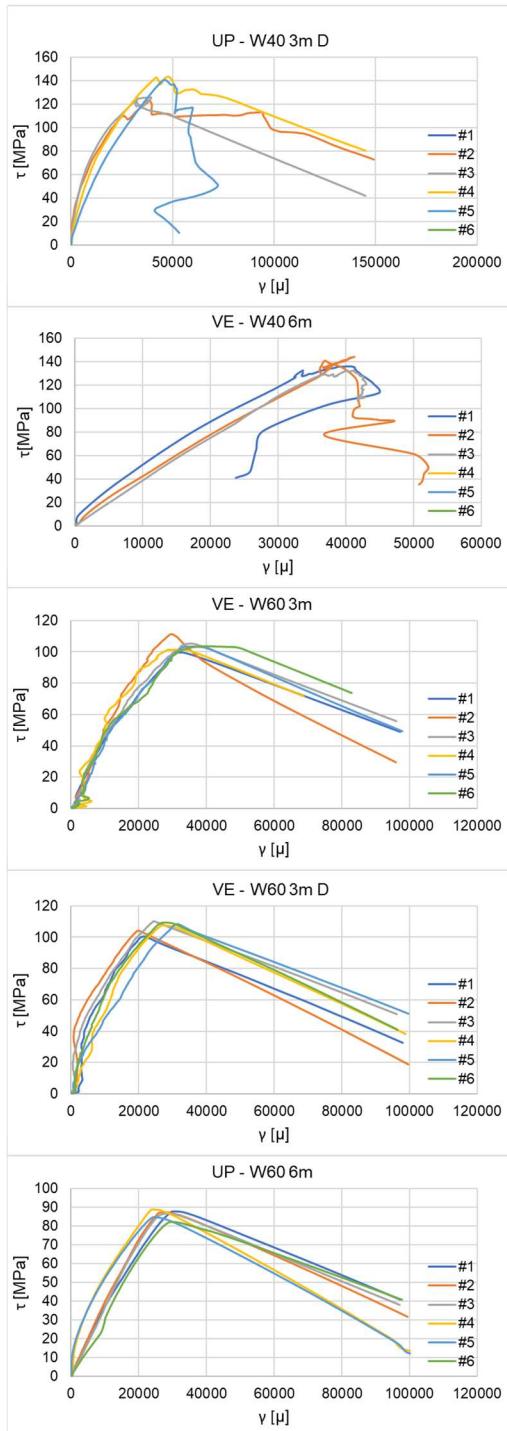
Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	146,1	4,2
#2	154,5	3,7
#3	150,1	3,6
#4	149,4	3,6
#5	151,2	4,1
#6	153,0	3,9
Média	150,7	3,8
Desv.Pad.	2,7	0,2
CoV	2%	5%

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	134,8	4,0
#2	146,9	3,2
#3	140,6	3,7
#4	143,5	3,3
#5	139,2	3,5
#6	132,0	3,6
Média	139,5	3,6
Desv.Pad.	5,0	0,3
CoV	4%	8%

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	161,5	4,1
#2	144,6	3,5
#3	148,6	3,4
#4	151,2	4,1
#5	137,3	3,2
#6	142,2	3,4
Média	147,6	3,6
Desv.Pad.	7,7	0,4
CoV	5%	10%

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	159,2	4,8
#2	141,4	5,2
#3	149,9	3,5
#4	141,7	4,3
#5	155,0	4,1
#6	-	-
Média	149,4	4,4
Desv.Pad.	7,1	0,6
CoV	5%	14%

Figura A.20 – Curvas de tensão vs. deformação por corte no plano e respetivos valores obtidos dos provetes: a) sem envelhecimento; b) W20 3m; c) W20 6m; d) W40 3m.



a)

b)

c)

d)

e)

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	-	-
#2	124,7	3,2
#3	126,5	3,3
#4	145,8	3,8
#5	143,4	3,6
#6	-	-
Média	135,1	3,5
Desv.Pad.	9,6	0,2
CoV	7%	7%

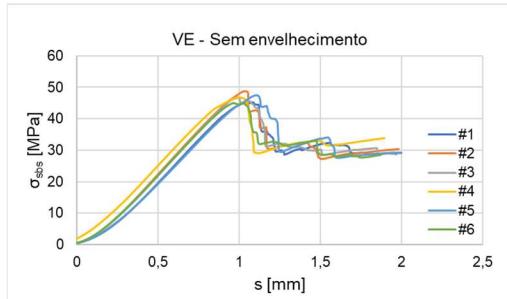
Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	136,0	3,9
#2	144,1	3,6
#3	132,5	3,7
#4	-	-
#5	-	-
#6	-	-
Média	137,5	3,7
Desv.Pad.	4,9	0,1
CoV	4%	3%

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	101,8	3,2
#2	111,3	4,6
#3	107,1	3,4
#4	102,7	4,6
#5	104,4	3,5
#6	105,0	3,7
Média	105,4	3,8
Desv.Pad.	3,1	0,6
CoV	3%	15%

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	106,3	3,7
#2	109,5	3,1
#3	115,2	3,3
#4	111,2	4,7
#5	113,2	3,4
#6	115,3	3,9
Média	111,8	3,7
Desv.Pad.	3,2	0,5
CoV	3%	15%

Provete	Resist. Máx (MPa)	Módulo (GPa)
#1	91,1	3,0
#2	91,4	3,5
#3	90,4	3,6
#4	93,2	2,9
#5	88,6	2,8
#6	86,5	3,6
Média	90,2	3,2
Desv.Pad.	2,1	0,3
CoV	2%	11%

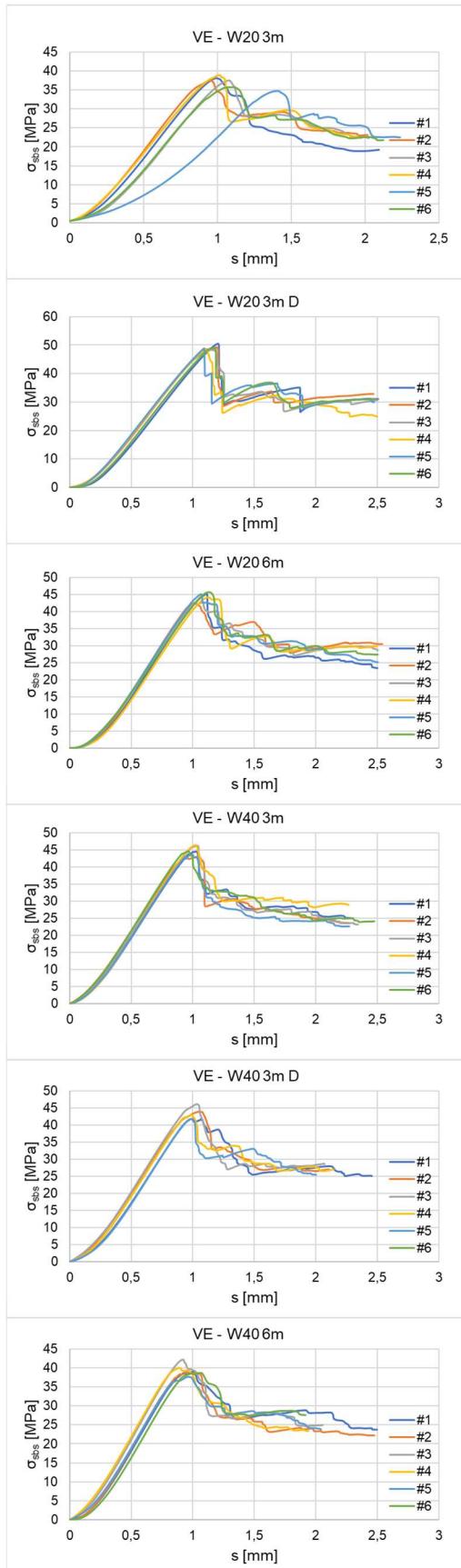
Figura A.21 – Curvas de tensão vs. deformação por corte no plano e respetivos valores obtidos dos provetes: a) W40 3m D; b) W40 6m; c) W60 3m; d) W60 3m D; e) W60 6m.



a)

Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	45,2
#2	48,8
#3	46,8
#4	46,8
#5	47,5
#6	45,0
Média	46,7
Desv.Pad.	1,3
CoV	3%

Figura A.22 – Curvas de tensão vs. deslocamento a meio vão do ensaio de corte interlaminar e respetivos valores obtidos dos provetes: a) Sem envelhecimento.



a)

b)

c)

d)

e)

f)

Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	38,1
#2	37,5
#3	37,5
#4	38,9
#5	34,7
#6	35,7
Média	37,1
Desv.Pad.	1,4
CoV	4%

Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	50,5
#2	49,3
#3	48,4
#4	48,4
#5	48,9
#6	48,9
Média	49,1
Desv.Pad.	0,7
CoV	1%

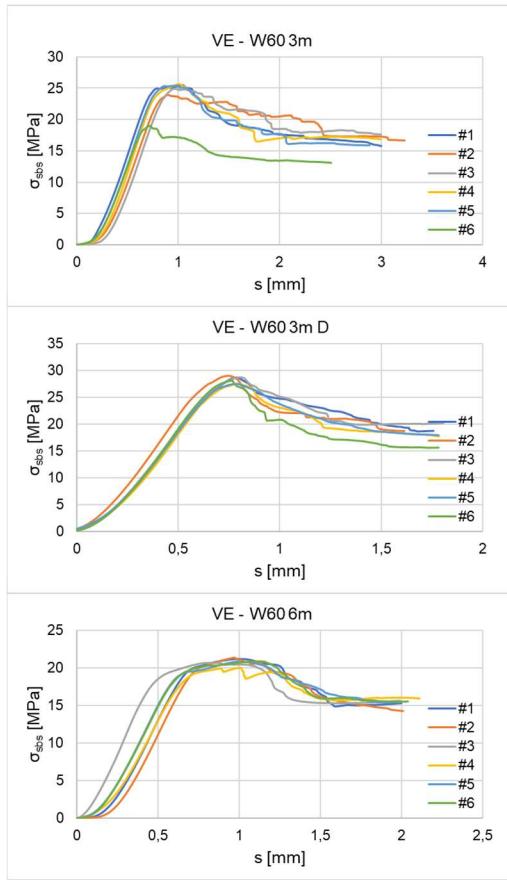
Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	45,1
#2	42,6
#3	42,6
#4	44,2
#5	45,1
#6	45,7
Média	44,2
Desv.Pad.	1,2
CoV	3%

Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	44,5
#2	43,1
#3	46,3
#4	46,4
#5	43,7
#6	44,6
Média	44,8
Desv.Pad.	1,2
CoV	3%

Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	41,8
#2	43,9
#3	46,1
#4	43,0
#5	41,8
#6	-
Média	43,3
Desv.Pad.	1,6
CoV	4%

Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	39,0
#2	39,0
#3	42,2
#4	40,0
#5	37,7
#6	38,7
Média	39,4
Desv.Pad.	1,4
CoV	4%

Figura A.23 – Curvas de tensão vs. deslocamento a meio vão do ensaio de corte interlaminar e respetivos valores obtidos dos provetes: a) W20 3m; b) W20 3m D; c) W20 6m; d) W40 3m; e) W40 3m D; f) W40 6m.



a)

b)

c)

Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	25,5
#2	23,9
#3	24,9
#4	25,7
#5	25,4
#6	19,0
Média	24,1
Desv.Pad.	2,3
CoV	10%

Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	28,7
#2	29,0
#3	28,7
#4	27,5
#5	27,5
#6	28,1
Média	28,2
Desv.Pad.	0,6
CoV	2%

Provete	Resist. Máx (MPa)
#1	21,2
#2	21,3
#3	20,7
#4	20,0
#5	20,9
#6	20,9
Média	20,8
Desv.Pad.	0,4
CoV	2%

Figura A.24 – Curvas de tensão vs. deslocamento a meio vão do ensaio de corte interlaminar e respetivos valores obtidos dos provetes: a) W60 3m; b) W60 3m D; c) W60 6m.