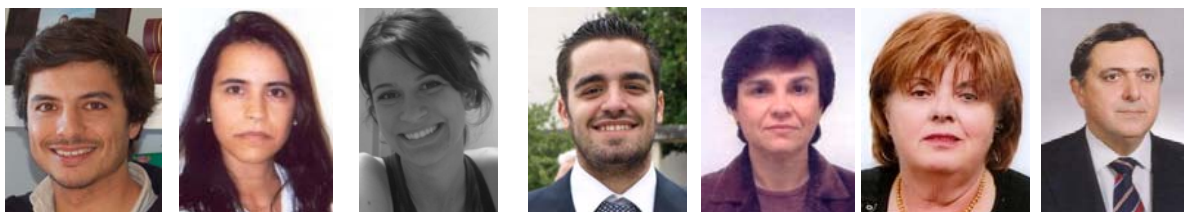


DEGRADAÇÃO AMBIENTAL DE PERFIS PULTRUDIDOS DE GFRP CONSTITUÍDOS POR MATRIZES DE POLIÉSTER E VINILÉSTER

Correia, J.R.¹, Cabral-Fonseca, S.², Carreiro, A.¹, Costa, R.¹,
Rodrigues, M.P.², Eusébio, M.I.², Branco, F.A.¹

¹ Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura, IST/ICIST, Universidade Técnica de Lisboa

² Laboratório Nacional de Engenharia Civil



RESUMO

Neste artigo apresentam-se os resultados preliminares de um projecto de investigação em curso, cujo objectivo é analisar os efeitos de diferentes agentes de degradação ambiental (água desmineralizada, água salgada, condensação em contínuo, nevoeiro salino, ciclos térmicos e radiação ultravioleta) nas propriedades físicas, químicas, estéticas e mecânicas de perfis pultrudidos de polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP), constituídos por resina de poliéster ou viniléster.

1- INTRODUÇÃO

A necessidade de maiores velocidades de construção em aplicações da engenharia civil, em conjunto com os problemas de durabilidade de materiais tradicionais como o aço e o betão armado, têm contribuído para o desenvolvimento de novas soluções estruturais. De entre essas soluções fazem parte os materiais plásticos reforçados com fibras (FRP) em geral, e os perfis pultrudidos de polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP) em particular. Estes materiais estão a ter um crescente número de aplicações, devido às suas diversas vantagens relativamente aos materiais tradicionais, que incluem o elevado desempenho mecânico, a leveza, as propriedades de isolamento, os reduzidos requisitos de manutenção e a durabilidade (Correia 2008, Correia *et al.* 2006).

Relativamente à durabilidade, a utilização de materiais FRP em navios, tubagens de indústrias corrosivas, tanques de

armazenamento e diversas aplicações das indústrias petrolíferas e de tratamento de águas residuais proporcionam evidência prática da boa durabilidade daqueles materiais em ambientes relativamente agressivos e corrosivos. No entanto, em obras de engenharia civil, os donos de obra, os projectistas e os empreiteiros requerem também informação extensa e validada sobre a durabilidade dos materiais, já que a vida útil das construções é geralmente projectada para durar pelo menos 50 anos. Sobre este aspecto, recentemente, diversos autores identificaram a durabilidade como um dos aspectos mais críticos no desenvolvimento dos materiais FRP, no que diz respeito à diferença entre a necessidade de informação percebida e a informação disponível e, assim, à necessidade de investigação futura em materiais FRP (Kharbari *et al.* 2003, Harries *et al.* 2003).

Este artigo apresenta os resultados preliminares de um projecto de investigação em curso sobre as alterações físicas,

químicas, estéticas e mecânicas sofridas por perfis pultrudidos de GFRP, constituídos por matrizes de poliéster e viniléster, após exposição acelerada a soluções de água desmineralizada e água salgada, condensação em contínuo, nevoeiro salino, ciclos térmicos e radiação ultra-violeta (Carreiro 2009, Costa 2009).

2- MATERIAIS

O material estudado foi obtido a partir de dois perfis pultrudidos de GFRP com secção tubular quadrada (50 mm × 50 mm, espessura de 5 mm), produzidos e comercializados em Portugal pela empresa ALTO. O material é constituído por fibras de vidro-E em camadas alternadas de reforços unidireccionais e mantas com fios dispersos, embebidas em resina de poliéster insaturado (perfil “UP”) ou viniléster (perfil “VE”). A primeira resina é utilizada na maior parte das aplicações estruturais quando não há requisitos particulares em termos de agressividade ambiental, enquanto que a segunda resina é normalmente escolhida para aplicações em ambientes quimicamente mais agressivos ou corrosivos. Os dois perfis foram produzidos com o mesmo teor e arquitectura de fibras de reforço, permitindo a comparação

durabilidade das resinas de poliéster e viniléster utilizadas em perfis pultrudidos de produção corrente.

3- MÉTODOS

3.1 - Ambientes de envelhecimento

Com o objectivo de avaliar a susceptibilidade à degradação dos dois tipos de material nos ambientes típicos das aplicações em Engenharia Civil, está a ser efectuado um estudo laboratorial envolvendo diferentes condições de exposição, que se encontram sintetizadas na Tabela 1.

3.2 - Procedimentos experimentais

Após diferentes períodos de exposição às diversas condições de envelhecimento, os provetes foram colocados no interior de sacos de polietileno hermeticamente fechados, onde permaneceram até serem efectuados os ensaios de caracterização, utilizando as seguintes técnicas experimentais:

(i) **Monitorização da variação de massa:** avaliação da massa ao longo do tempo de provetes de controlo (com geometria idêntica à dos utilizados nos ensaios de DMA), removidos periodicamente dos

Tabela 1 – Condições dos ambientes de envelhecimento.

Tipo de exposição	Duração	Condições
Água desmineralizada (W-20), (W-40), (W-60)	3, 6, 9, 12, 18, 24 meses (a)	<ul style="list-style-type: none"> Temperaturas: 20 (±2) °C, 40 (±1) °C e 60 (±1) °C
Solução salina (S-20), (S-40), (S-60)		<ul style="list-style-type: none"> Composição: 35 g/l NaCl Temperaturas: 20 °C (±2) °C, 40 (±1) °C e 60 (±1) °C
Condensação em contínuo (CC-40)	3, 6, 9 meses (a)	<ul style="list-style-type: none"> Temperatura: 40 (±2) °C Humidade relativa: 100 %
Ciclos térmicos	70, 120, 190 ciclos	<ul style="list-style-type: none"> 6 horas a -5 °C + 6 horas a +40 °C
Câmara de nevoeiro salino	1000, 2000, 3000 horas	<ul style="list-style-type: none"> Ambiente neutro, de acordo com a ISO 7253 (1996)
Câmara QUV	1000, 2000, 3000 horas (b)	<ul style="list-style-type: none"> Envelhecimento artificial acelerado com lâmpadas fluorescentes de radiação UV: 4 horas com radiação UV a 50 °C (ciclo seco) + 4 horas sem radiação UV a 60 °C com condensação (ciclo molhado), de acordo com a ISO 4892 (1994)
Exposição em ambiente natural	1, 2, 5, 10 anos	<ul style="list-style-type: none"> No terraço do edifício principal do LNEC, onde são monitorizados a humidade relativa, a temperatura e a componente UV proveniente da radiação solar
Campanhas de ensaio já realizadas: (a) 3, 6 e 9 meses; (b) 1000, 2000 e 3000 horas		

directa do desempenho em termos de

ambientes de envelhecimento por imersão e condensação em contínuo.

(ii) Análise mecânica dinâmica (DMA): avaliação da resposta viscoelástica do material e determinação da sua temperatura de transição vítrea (T_g), de acordo com a norma ISO 6721 (1996). Foram efectuados ensaios em provetes com as dimensões nominais de 5 mm × 15 mm × 60 mm, tendo sido avaliados três provetes por cada condição de envelhecimento e duração de exposição. O ensaio foi efectuado num equipamento da marca *TA Instruments*, modelo *Q800*, tendo sido usada uma configuração de três pontos de carga, uma frequência constante de 1 Hz e uma amplitude de deformação de 15 μ m. A análise foi efectuada na gama de temperaturas 25-200 °C, a uma taxa de aquecimento de 2 °C/min.

(iii) Comportamento mecânico: foram efectuados os seguintes ensaios mecânicos em, pelo menos, 5 provetes por cada duração e condição de envelhecimento:

(iii.1) Propriedades em tracção, de acordo com a norma ISO 527 – partes 1 e 5 (1997), em provetes de dimensões 5 mm × 25 mm × 300 mm, sem reforço das extremidades. O ensaio foi realizado numa máquina de ensaios mecânicos da marca *Instron* com uma capacidade de 100 kN, a uma velocidade de carga de 2 mm/min.

(iii.2) Propriedades em flexão, em três pontos de carga, de acordo com a norma ISO 14125 (1998) em provetes de

dimensões 5 mm × 15 mm × 150 mm, com um vão de 100 mm. O ensaio foi realizado numa máquina de ensaios da marca *Seidner Form Test*, com 10 kN de capacidade, a uma velocidade de 2 mm/min.

(iii.3) Propriedades em compressão, determinadas de acordo com a norma ASTM D695 (2002), em provetes de dimensões 5 mm × 15 mm × 20 mm.

(iii.4) Resistência ao corte interlaminar, de acordo com a norma de ensaio ASTM D2344 (2000), em provetes de dimensões 5 mm × 10 mm × 30 mm, com um vão de 20 mm. Os ensaios foram efectuados na mesma máquina onde foram realizados os ensaios de flexão, com uma velocidade de 1 mm/min.

4- APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 - Caracterização inicial

Os resultados da caracterização físico-química efectuada inicialmente em ambos os materiais encontram-se resumidos na Tabela 2.

Verifica-se que o teor em fibra de vidro e a massa volúmica do perfil VE são ligeiramente superiores aos do perfil UP. Por outro lado, a temperatura de transição vítrea (obtida do ponto inicial do decaimento da curva do módulo de armazenamento, $E'_{initial}$, e o retirado do pico da curva do factor de perda, $\tan \delta$) do perfil VE é

Tabela 2 – Propriedades físico-químicas dos materiais.

Propriedade	Método		Perfil UP	Perfil VE
Teor em fibra de vidro (%)	Calcinação		68.4 ± 1.8	68.7 ± 0.4
Massa volúmica (g/cm ³)	Método de imersão		1.869 ± 0.113	2.028 ± 0.052
T_g (°C)	DMA	$E'_{initial}$	107.9 ± 10.8	98.6 ± 7.0
		$\tan \delta$	146 ± 2.3	126.9 ± 2.3
	Tracção	$\sigma_{tu,x}$ (MPa)	406 ± 31	393 ± 51
		$E_{t,x}$ (GPa)	37.6 ± 2.6	38.9 ± 4.1
	Flexão	$\sigma_{fu,x}$ (MPa)	417 ± 65	537 ± 73
		$E_{f,x}$ (GPa)	20.0 ± 6.9	28.4 ± 3.4
Propriedades mecânicas	Compressão	$\sigma_{cu,x}$ (MPa)	280 ± 123	360 ± 131
	Corte interlaminar	$\sigma_{u,sbs}$ (MPa)	38.5 ± 2.7	39.2 ± 4.2

menor que a do perfil UP. Do ponto de vista mecânico, os perfis UP e VE iniciam a perda de desempenho acima de 108 °C e 99 °C, respectivamente.

Relativamente ao comportamento mecânico, em todos os ensaios de caracterização (tracção, flexão, compressão e corte interlaminar), os dois perfis mostram um comportamento elástico linear até à rotura. Uma análise comparativa mostra que os perfis são equivalentes, no que diz respeito às suas propriedades em tracção (resistência, $\sigma_{tu,x}$, e módulo de elasticidade, $E_{t,x}$) e à resistência ao corte interlaminar ($\sigma_{u,sbs}$). No entanto, em flexão, o perfil VE apresenta um desempenho superior, quer em termos de resistência ($\sigma_{fu,x}$), quer de rigidez ($E_{f,x}$). Devido à elevada dispersão de resultados obtidos para a resistência em compressão ($\sigma_{cu,x}$), foi decidido não incluir este ensaio na monitorização do desempenho dos materiais após os envelhecimentos previstos.

4.2 - Envelhecimento higrotérmico

4.2.1 Variação de massa

A Fig. 1 ilustra a variação de massa observada para ambos os perfis nos diferentes meios de imersão (água desmineralizada e solução salina), às diferentes temperaturas (20 °C, 40 °C e 60 °C), assim como para a condensação em contínuo a 40 °C.

Observa-se que para as mesmas condições de envelhecimento (meio de imersão e temperatura), a variação de massa dos dois perfis é distinta, o que reflecte capacidades de absorção diferentes. Com efeito, o aumento de massa observado no perfil VE é consideravelmente menor que o exibido pelo perfil UP, para todas as condições de envelhecimento higrotérmico. Para além disso, para a mesma temperatura, a capacidade de absorção na solução salina é sempre inferior à observada na imersão em água desmineralizada.

A evolução das curvas experimentais de variação de massa mostra um comportamento de *Fick*, em que a taxa de absorção aumenta com a temperatura, particularmente no início da exposição.

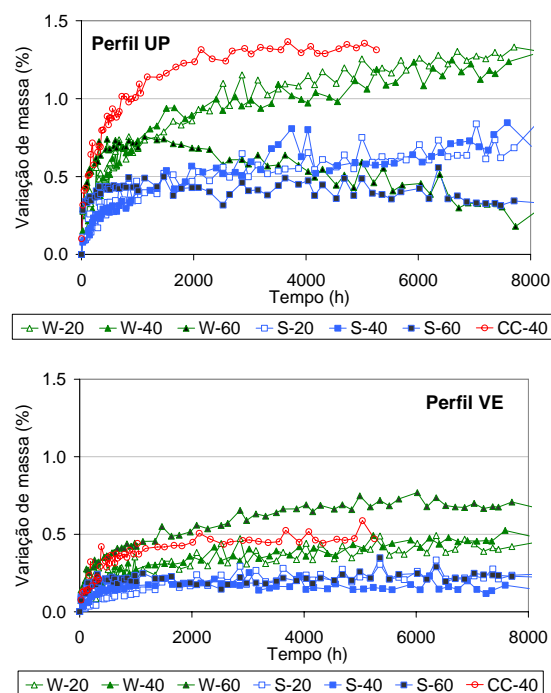


Fig.1 – Variação de massa dos perfis UP (em cima) e VE (em baixo) para as diferentes condições de envelhecimento higrotérmico.

No perfil UP observa-se que o aumento da temperatura de imersão não é acompanhado por um incremento da massa. Este resultado pode ser atribuído a uma potencial perda de massa que ocorre devido à extracção de componentes de baixo peso molecular, durante a imersão – é expectável que este efeito seja intensificado pela temperatura.

Com efeito, a variação de massa que ocorre durante este tipo de envelhecimentos resulta habitualmente de um balanço entre a quantidade de água absorvida e a perda de material. No envelhecimento por condensação em contínuo a 40 °C, os materiais exibem uma maior variação de massa, quando comparados com a imersão em água desmineralizada à mesma temperatura.

4.2.2 Análise mecânica dinâmica

Na Fig. 2 apresentam-se as curvas experimentais de DMA após a exposição às diferentes condições de envelhecimento higrotérmico durante 9 meses (para cada condição é incluída apenas uma curva representativa, apesar de terem sido ensaiados três provetes). No eixo das ordenadas do lado esquerdo encontra-se repre-

sentado o módulo de armazenamento (E'), que exibe o “degrau” característico na região da transição vítrea. No eixo das ordenadas do lado direito encontra-se representado o factor de perda ($\tan \delta$), que apresenta um pico típico dessa região de transição.

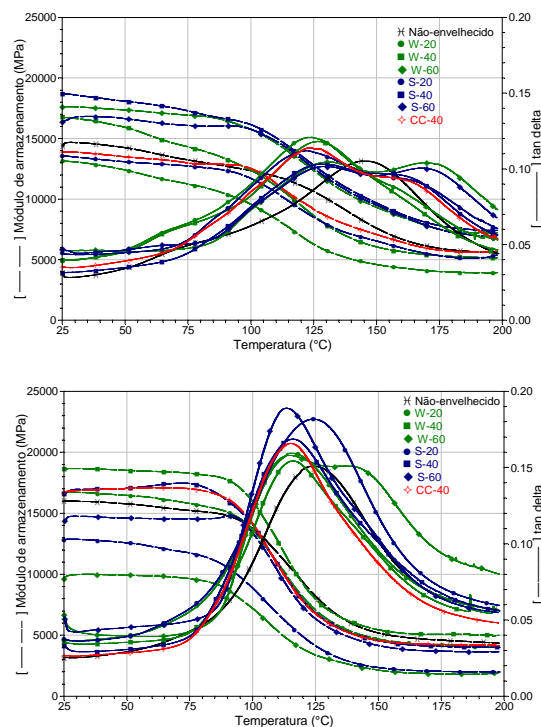


Fig. 2 – Curvas de DMA dos perfis UP (em cima) e VE (em baixo) após 9 meses de exposição nas diferentes condições de envelhecimento.

O gráfico da Fig. 3 mostra a variação de T_g (valor médio \pm desvio padrão) para ambos os perfis após 3, 6 e 9 meses de exposição às diferentes condições de envelhecimento.

O formato exibido pela curva de E' na região de transição reflecte, essencialmente, as alterações sofridas pela matriz polimérica, que passa de um estado vítreo a um estado elastomérico, característico da sua natureza viscoelástica. Com efeito, nesta gama de temperaturas, o material de reforço (neste caso, fibras de vidro) não sofre uma redução na sua rigidez. Note-se, contudo, que a qualidade da interface fibra-matriz pode igualmente reflectir-se nos resultados de DMA.

Esta técnica permite avaliar a contribuição da natureza viscoelástica da matriz para o comportamento do compósito como um todo, o que neste estudo ajudará a com-

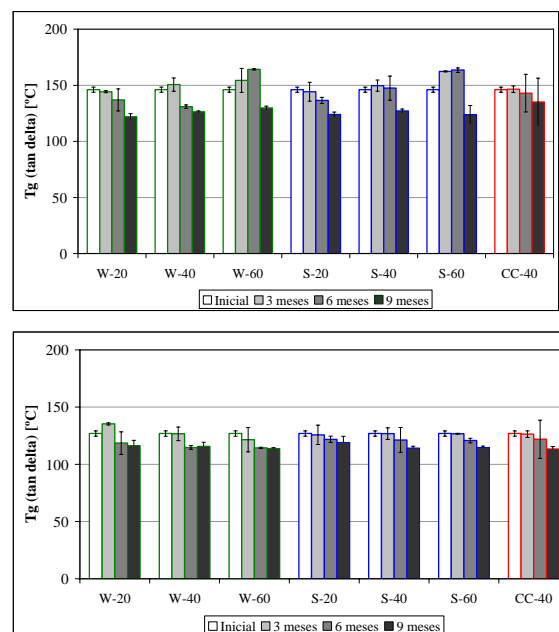


Figura 3: Variação de T_g dos perfis UP (esquerda) e VE (direita) ao longo do tempo de exposição nas diferentes condições de envelhecimento higrotérmico

preender a influência da natureza da matriz na durabilidade dos compósitos em estudo.

No caso do **perfil UP**, imerso em água a 20°C em ambos os meios de imersão – água desmineralizada e solução salina – observa-se um decréscimo do valor de T_g ao longo do tempo. Para além disso, destaca-se o aparecimento de um segundo “pico” na curva de $\tan \delta$ (Fig. 2). O surgimento deste segundo “pico”, associado ao alargamento da base da curva, sugere que o envelhecimento do material envolve um mecanismo de plasticização. Com efeito, a coexistência de dois “picos” na curva de $\tan \delta$ pode ser atribuída a diferentes mobilidades dos segmentos da matriz polimérica, causada por diferentes extensões do mecanismo de plasticização. Nas imersões a 40 °C, o comportamento é diferente, uma vez que na 1ª colheita (3 meses) é detectado um ligeiro aumento de T_g , devido a efeitos de pós cura induzidos pela temperatura. Contudo, nas colheitas posteriores, há uma inversão desta tendência, com um decréscimo de cerca de 13 %, ao fim de 9 meses de envelhecimento em ambos os meios de imersão. Nas imersões a 60 °C observa-se igualmente uma inversão da tendência de variação de T_g . No entanto, esta inversão dá-se mais tarde, só se detectando após mais de 6 meses de imersão.

As variações de T_g no **perfil VE** apresentam uma tendência para a diminuição ao longo do tempo de exposição, sendo mais independente da temperatura de imersão. As curvas experimentais de $\tan \delta$ não mostram alargamento da sua base, sugerindo que a estrutura molecular não sofre alterações significativas (a única exceção é na imersão em água à temperatura mais elevada, onde se observa o alargamento da base desta curva). Contrariamente aos resultados obtidos com o perfil UP, não há evidência da presença de humidade responsável por fenómenos de plasticização. Este resultado é consistente que a menor capacidade de absorção de água que o material do perfil VE tem, quando comparado com o perfil UP.

A absorção de água por compósitos de matriz de poliéster insaturado e de viniléster é conhecida por causar plasticização a curto prazo e hidrólise a longo prazo, por ataque das ligações éster (Chu e Kharbari 2005). A localização deste grupo nas extremidades da cadeia molecular do viniléster (por oposição à do poliéster, onde se encontram ao longo da cadeia) confere-lhe maior resistência ao mecanismo de plasticização. Ambos os fenómenos induzem um maior nível de mobilidade molecular, resultando num abaixamento da temperatura de transição vítrea, embora esse decréscimo possa por vezes ser contrariado pela cura residual do material. Estes fenómenos competem entre si, provocando flutuações da temperatura de transição vítrea, analisada em função do tempo de exposição, como foi observado, particularmente com os resultados do estudo efectuado sobre o perfil de UP.

4.2.3 Caracterização mecânica

Propriedades em tracção: apresenta-se nas Figs. 4 e 5 (valor médio \pm desvio padrão) os resultados obtidos nos ensaios de tracção de ambos os perfis, nomeadamente a resistência e o módulo de elasticidade em tracção, em função do tempo de exposição e do ambiente de envelhecimento, respectivamente.

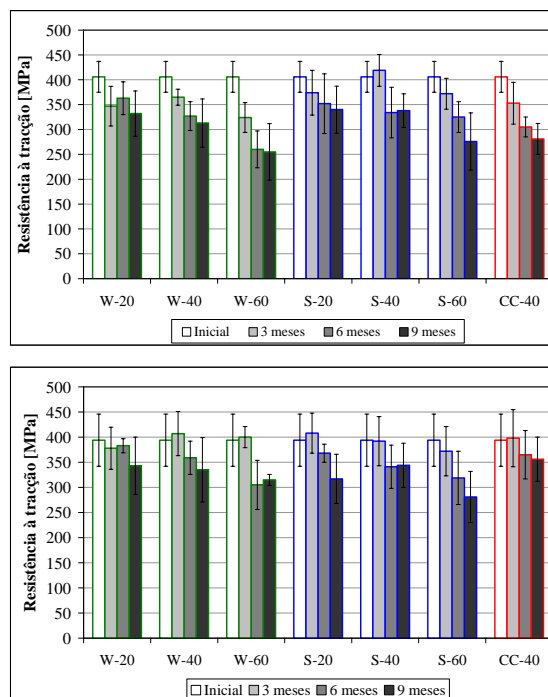


Fig. 4 – Resistência à tracção dos perfis UP (em cima) e VE (em baixo) após envelhecimento higro-térmico.

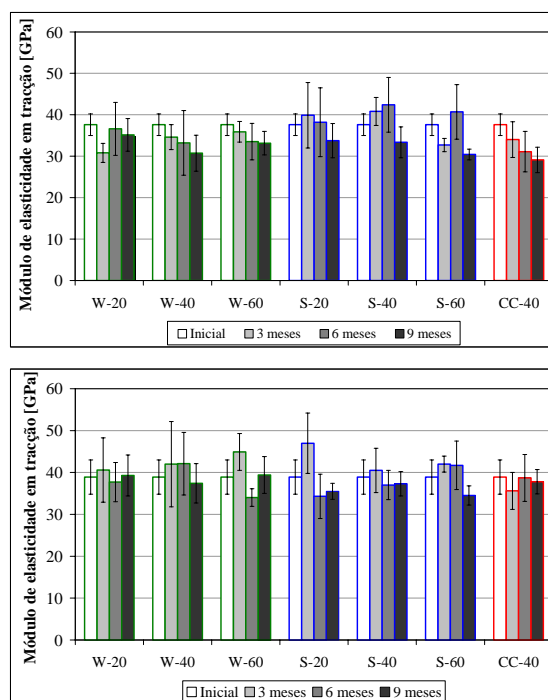


Fig. 5 – Módulo de elasticidade em tracção dos perfis UP (em cima) e VE (em baixo) após envelhecimento higro-térmico.

Na Fig. 4 mostra-se que, para todos as condições de envelhecimento e para ambos os materiais, ocorreu uma redução geral da resistência à tracção com a duração de exposição. O nível da degradação da resistência à tracção aumentou com a temperatura do meio de imersão, com as

máximas reduções a ocorrerem para 60°C. Ao fim de 9 meses, o menor nível de retenção foi de 63 % para imersão em água desmineralizada a 60°C do perfil UP. No caso do perfil VE, a retenção da resistência na mesma condição de envelhecimento foi de 80 %; aqui, o ambiente mais gravoso foi a imersão em água salgada, tendo-se obtido uma retenção de 73 %. Para a generalidade das condições higrotérmicas e períodos de exposição a retenção da resistência à tracção do perfil VE foi superior à do perfil PU.

No que diz respeito ao módulo de elasticidade em tracção, a variação exibida pelos valores médios com o período de exposição, que foi de certa forma não monotónica (c.f. Fig. 5) e associada a valores relativamente elevados do coeficiente de variação, torna mais difícil estabelecer análises sistemáticas e comparações entre os dois materiais. No entanto, nesta fase do programa experimental, para todas as condições e durações de exposição, é possível concluir que a retenção da rigidez foi consideravelmente superior à da resistência. Por outro lado, após 9 meses de exposição, a retenção de rigidez do perfil VE foi significativamente superior à do perfil UP, onde já parece ser evidente a ocorrência de alguma perda de rigidez.

Finalmente, é de salientar a semelhança entre os valores da retenção de propriedades mecânicas correspondentes à imersão em água desionizada a 40 °C e a condensação em contínuo a 40 °C.

Propriedades em flexão: apresentam-se nas Figs. 6 e 7 os resultados obtidos nos ensaios de flexão, nomeadamente a resistência à tracção em flexão e o módulo de elasticidade em flexão para ambos os perfis, respectivamente, em função da duração e tipo de exposição higrotérmica.

O nível de degradação da resistência à flexão de ambos os perfis aumentou com a temperatura do meio de imersão, sendo máxima para 60°C – este resultado está de acordo com o comportamento já relatado para a resistência à tracção e com resultados obtidos por outros autores com perfis pultrudidos de fibra de vidro (e.g. Van de

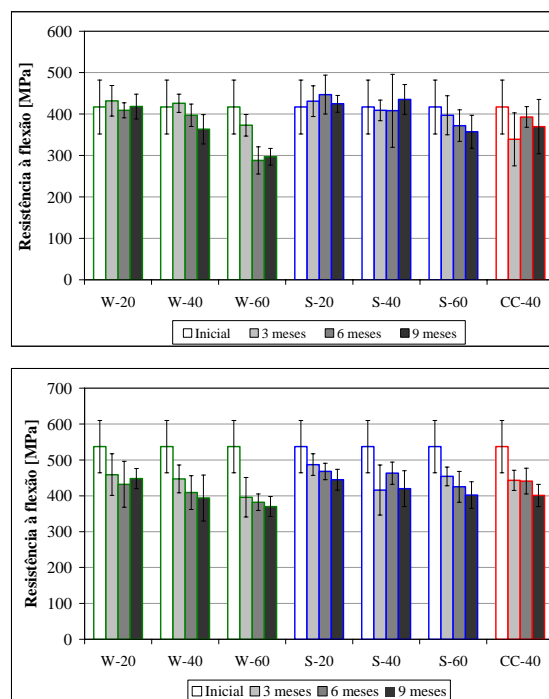


Fig. 6 – Resistência à flexão dos perfis UP (em cima) e VE (em baixo) após envelhecimento higrotérmico

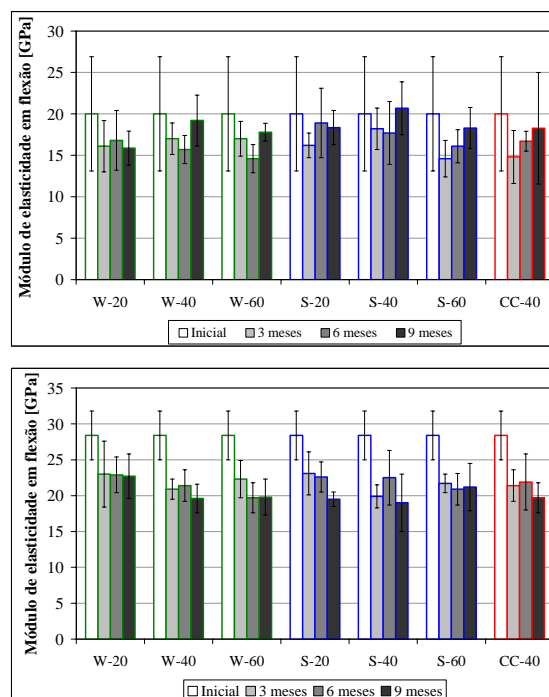


Fig. 7 – Módulo de elasticidade em flexão dos perfis UP (em cima) e VE (em baixo) após envelhecimento higrotérmico

Velde e Kiekens 2001, Nishizaki e Meiarashi 2002). Após 9 meses de exposição, os menores níveis de retenção foram 71 % e 69 %, para os perfis UP e VE, respectivamente, imersos em água desmineralizada a 60°C. Ao contrário do comportamento exibido nos ensaios de tracção, o perfil VE

não apresentou um melhor desempenho do que o perfil UP para as diferentes condições de envelhecimento; em muitas situações, a retenção de resistência foi mesmo consideravelmente inferior – pensa-se que tal poderá estar associado, em parte, à considerável dispersão de resultados obtidos na caracterização inicial das propriedades em flexão do perfil VE e possivelmente a algum efeito de pós cura no perfil UP (identificado nos ensaios de DMA já descritos).

O módulo de elasticidade à flexão após 9 meses de exposição diminuiu em praticamente todas as condições de envelhecimento para ambos os perfis. Na maioria das situações, para temperaturas idênticas, a redução de rigidez em água desmineralizada foi superior à verificada em água salgada. Para as diferentes condições de envelhecimento, tal como se tinha verificado na resistência, a redução de rigidez foi ligeiramente superior no perfil VE do que no perfil UP, com reduções após imersão a 60°C entre 25 % a 30 % no perfil VE e 10 % a 20 % no perfil UP.

Tal como se havia verificado nos ensaios de tracção, a variação das propriedades mecânicas em flexão após imersão em água desmineralizada a 40 °C foi semelhante à registada após igual período de condensação em contínuo a 40 °C.

Resistência ao corte interlaminar:

a Fig. 8 ilustra a variação da resistência ao corte interlaminar em função da duração e tipo de exposição higrotérmica para ambos os perfis. Como se pode observar na Fig. 8, ocorreram reduções significativas da resistência ao corte interlaminar em função da duração e temperatura de imersão. Para a temperatura de imersão mais elevada de 60°C, a retenção de resistência após 9 meses de exposição em água desmineralizada foi de aproximadamente 52 % no perfil UP e 53 % no perfil VE. Já em água salgada, aqueles valores foram ligeiramente superiores, tendo sido obtidas retenções de 56 % e 61 % nos perfis UP e VE, respectivamente. Também se pode concluir que a retenção de resistência dos provetes expostos a imersão em água desmineraliza-

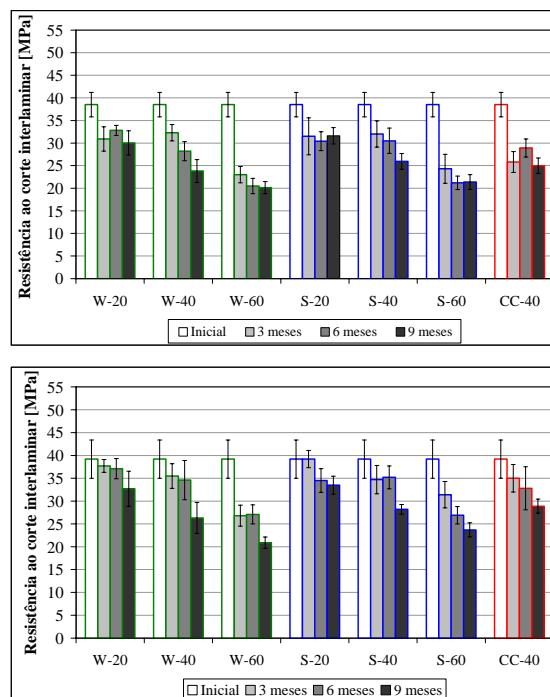


Fig. 8 – Resistência ao corte interlaminar dos perfis UP (em cima) e VE (em baixo) após exposição higrotérmica.

da a 40°C e a condensação em contínuo foi muito semelhante.

Finalmente, salienta-se o melhor desempenho exibido pelo perfil VE para todos os períodos e condições de envelhecimento higrotérmico, resultado que pode ser atribuído ao facto de a resistência ao corte interlaminar ser uma propriedade mecânica que depende essencialmente da matriz e da interface matriz-fibra.

4.3 - Envelhecimento acelerado artificial - QUV

4.3.1 Análise mecânica dinâmica

A Fig. 9 mostra as curvas experimentais de DMA para ambos os perfis, após exposição na câmara de QUV durante 1000, 2000 e 3000 horas. Em geral, o envelhecimento artificial acelerado causa um ligeiro aumento do módulo de armazenamento na região vítrea, assim como do valor da temperatura de transição vítrea, que é consistente com um fenómeno de pós-cura induzido pela radiação ultravioleta e o aumento da temperatura. Este comportamento é mais significativo no perfil UP.

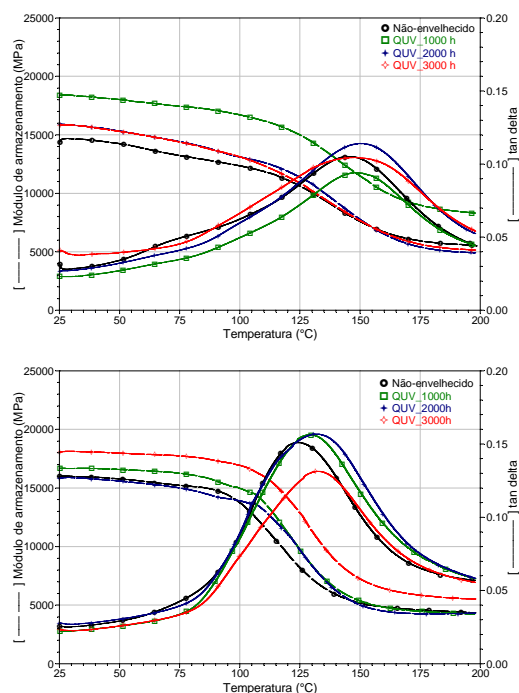


Fig. 9 – Curvas de DMA dos perfis UP (em cima) e VE (em baixo) após 1000, 2000 e 3000 horas de exposição na câmara de QUV.

4.3.2 Caracterização mecânica

Propriedades em tracção: a resistência e o módulo de elasticidade em tracção medidos em provetes de ambos os perfis sujeitos aos diferentes períodos de exposição na câmara QUV são apresentados na Fig. 10.

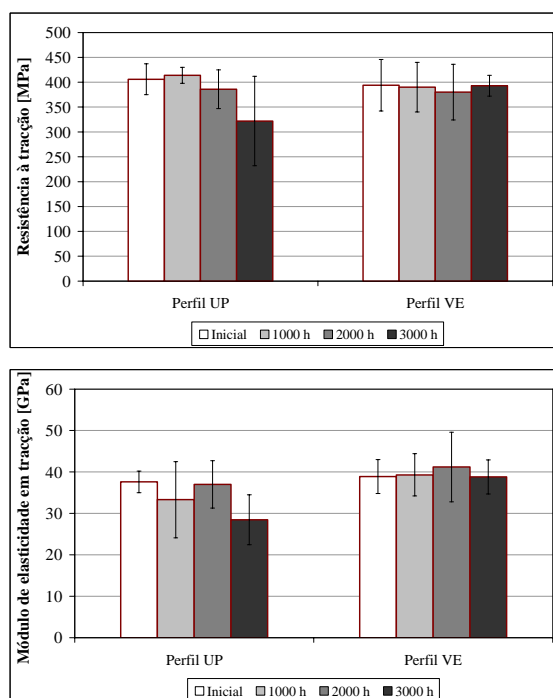


Fig. 10 – Resistência (em cima) e módulo de elasticidade (em baixo) em tracção após exposição na câmara QUV.

Durante as 3000 h de exposição na câmara QUV, a resistência e o módulo de elasticidade à tracção do perfil VE foram apenas marginalmente afectados. Já para o perfil UP é possível identificar uma redução das propriedades com o período de exposição, que é particularmente consistente no caso da resistência à tracção. Ao fim de 3000 h de exposição na câmara QUV, a resistência e módulo de elasticidade em tracção do perfil UP diminuíram para 79 % e 76 % dos valores iniciais correspondentes, respectivamente.

Propriedades em flexão: a resistência e o módulo de elasticidade em flexão medidos em provetes de ambos os perfis sujeitos aos diferentes períodos de exposição na câmara QUV são apresentados na Fig. 11.

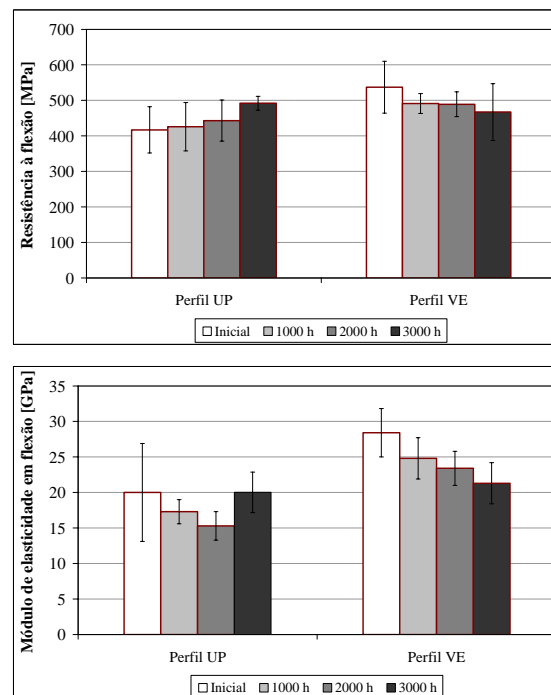


Fig. 11 – Resistência (em cima) e módulo de elasticidade (em baixo) em flexão após exposição na câmara QUV.

Relativamente ao perfil VE, salienta-se o facto de a resistência e o módulo de elasticidade em flexão terem sido significativamente afectadas após 3000 h de exposição na câmara QUV, sobretudo por comparação com as propriedades em tracção (para as quais a retenção de resistência e rigidez foram ambas de 100 %). De facto, foram agora obtidas retenções naquelas propriedades de 87 % e 75 %, respectiva-

mente. A este respeito é de salientar o facto de a superfície exposta à radiação UV ter sido precisamente a superfície que, nos ensaios de flexão, foi submetida a tensões de tracção. Nos ensaios de tracção, a distribuição de tensões na secção é aproximadamente uniforme, o que justificará o menor efeito do envelhecimento. Por outro lado, note-se que a resposta mecânica em tracção depende essencialmente das fibras de reforço, enquanto que em flexão o papel desempenhado pela matriz naquela resposta assume um relevo maior.

No que diz respeito ao perfil UP, e em particular à sua resistência à tracção, observou-se um aumento daquela propriedade com o período de exposição. A explicação para este resultado, que não era esperado inicialmente, poderá estar eventualmente associada ao efeito de pós-cura (já relatado nos ensaios de DMA) proporcionado pela temperatura elevada no interior da câmara e pela própria radiação UV. A variação do módulo de elasticidade do perfil UP com o período de exposição é bastante menos consistente e, também por estar associada a desvios-padrão consideráveis, é mais difícil de analisar.

Resistência ao corte interlaminar: a resistência ao corte interlaminar dos provetes de ambos os perfis submetidos aos diferentes períodos de exposição na câmara QUV é ilustrada na Fig. 12. Após 3000 h de exposição, a resistência ao corte interlaminar de ambos os perfis foi apenas ligeiramente reduzida em 7 % a 8 %.

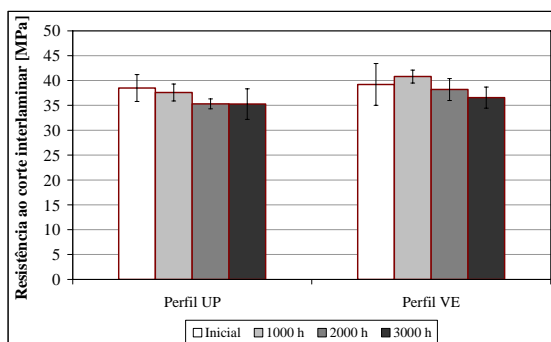


Fig. 12 – Resistência ao corte interlaminar após exposição na câmara QUV.

5- CONCLUSÕES

Neste artigo foram apresentados os resultados preliminares de um projecto de investigação em curso sobre a degradação ambiental sofrida por perfis pultrudidos de GFRP constituídos por resina de poliéster insaturado ou viniléster. Com base nos resultados já disponíveis, é possível referir as seguintes conclusões:

1. A capacidade de absorção de água dos perfis de GFRP e a sua dependência da temperatura é muito distinta em função da natureza da matriz polimérica – para condições de envelhecimento similares, o perfil VE exibiu aumentos de massa consideravelmente inferiores aos do perfil UP.

2. Após 9 meses de imersão em água desmineralizada e em água salgada a diferentes temperaturas (20 °C, 40 °C e 60 °C), bem como após 9 meses de condensação em contínuo a 40 °C, as propriedades mecânicas dos perfis de GFRP constituídos pelos dois diferentes tipos de resinas foram consideravelmente afectadas: para a generalidade das durações e condições de envelhecimento higrotérmico, a retenção da resistência à tracção (uma propriedade mecânica dominada essencialmente pelas fibras) e da resistência ao corte interlaminar (uma propriedade dominada essencialmente pela matriz e pela interface matriz-fibra) do perfil VE foi consideravelmente superior à do perfil UP; no que diz respeito à retenção da resistência à flexão, a tendência dos resultados não é tão clara e, em certa medida, os resultados são até contraditórios com os obtidos nos ensaios de tracção e corte interlaminar – de facto, após 9 meses de exposição, o perfil UP exibiu retenções de resistência e rigidez que, de um modo geral, são superiores às obtidas para o perfil VE. Estes últimos resultados podem estar a ser mascarados, em certa medida, pelo efeito de alguma pós-cura da resina do perfil UP, detectada nos ensaios de DMA.

3. A degradação mencionada acima foi essencialmente devida a fenómenos físicos, como a plasticização da matriz polimérica, já que não foi detectada degradação química apreciável por análise FTIR (Carreiro 2009, Costa 2009). No entanto,

este tipo de degradação pode influenciar a utilização de perfis de GFRP em ambientes húmidos (estruturas submersas ou sujeitas em permanência a níveis elevados de humidade) e, especialmente, em zonas tropicais (com humidade e temperaturas elevadas), em que a utilização de diferentes sistemas de resinas e/ou protecções superficiais (ex. *gel coats*, pinturas) podem ter de ser considerados para melhorar o desempenho do material.

4. O perfil UP, que exibiu maior retenção de água (medida pela variação mássica) foi o tipo de perfil que mostrou mais sinais de plasticização nas curvas experimentais das análises mecânicas dinâmicas (DMA). Os valores da temperatura de transição vítrea, também medidos por DMA, sofreram uma redução como consequência daquele mecanismo de plasticização. Não obstante, para algumas condições de envelhecimento, no perfil UP, aquela redução foi mascarada pela ocorrência de fenómenos de pós-cura da resina. Estes fenómenos competitivos resultaram em flutuações da temperatura de transição vítrea em função do período de exposição.

5. Relativamente ao envelhecimento acelerado na câmara QUV, utilizado para avaliar os efeitos sinérgicos da exposição simultânea a radiação UV, humidade e temperatura, após 3000 h de exposição, o perfil VE sofreu alterações marginais em tracção e corte interlaminar, embora se tenham registado alterações mais significativas em flexão, para a qual se obteve uma retenção de resistência de 87 %. Já no perfil UP, após 3000 h de exposição, apesar de a resistência ao corte interlaminar praticamente não ter sido afectada, as propriedades em tracção sofreram uma redução considerável, com uma retenção de resistência de 79 %.

6. No entanto, a análise FTIR mostrou que há evidência de alterações químicas nas superfícies dos materiais dos provetes de ensaio expostos à radiação UV. Os resultados das análises químicas, em conjunto com os resultados dos ensaios mecânicos, confirmam que os efeitos da exposição à radiação UV estão essencialmente confinados a uma espessura superficial de alguns micrómetros, provocando ape-

nas uma redução ligeira das propriedades mecânicas dos perfis, sobretudo em tracção e corte interlaminar. No entanto, a radiação UV pode causar alterações consideráveis nas propriedades estéticas, como a cor e o brilho (Carreiro 2009, Costa 2009). Assim, este tipo de degradação é um problema que deve ser considerado em aplicações exteriores.

As tendências descritas nas conclusões acima referidas serão avaliadas e eventualmente confirmadas nos ensaios seguintes a realizar no âmbito deste projecto de investigação. Para além disso, serão realizados ensaios em provetes sujeitos a um envelhecimento natural, tendo em vista o estabelecimento de uma correlação entre a degradação ambiental natural (em Lisboa) e os processos acelerados de degradação ambiental utilizados neste programa experimental.

6- REFERÊNCIAS

- ASTM D695 2002. Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM D2344 2000. Standard Test for Short-beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and their Laminates, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- Carreiro, A. 2009. Durabilidade de perfis pultrudidos de viniléster reforçado com fibras de vidro. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, IST (versão provisória).
- Costa, R. 2009. Durabilidade de perfis pultrudidos de poliéster reforçado com fibras de vidro. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, IST.
- Chu, W., Karbhari, V.M. 2005. Effect of water sorption on performance of pultruded E-glass/vinylester composites, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17, p. 63-71.
- Correia, J.R. 2008. GFRP Pultruded Profiles in Civil Engineering: Hybrid Solutions, Bonded Connections and Fire Behaviour, Tese de Doutoramento, IST/UTL.
- Correia, J.R., Cabral-Fonseca, S., Branco, F.A., Ferreira, J., Eusébio, M.I., Rodrigues, M.P. 2006. Durability of Glass Fibre Reinforced Polyester (GFRP) Pultruded Profiles

- for Construction Applications, *Mechanics of Composite Materials*, 42, p. 325-338.
- Harries, K.A., Porter, M.A., Busel, J.P. 2003. FRP Materials and Concrete Research Needs, *Concrete International*, ACI, October, p. 69-74.
- ISO 527 1997. *Plastics - Determination of Tensile Properties - Part 1: General Principles; Part 5: Test Conditions for Unidirectional Fiber-Reinforced Plastic Composites*, International Standards Organization, Genève.
- ISO 4892 1994. *Plastics - Methods of Exposure to Laboratory Light Sources - Part 1: General Guidance; Part 3: Fluorescent UV Lamps*, International Standards Organization, Genève.
- ISO 6721 1996. *Plastics - determination of dynamic mechanical properties - Part 1: General Principles; Part 5: Flexural vibration - Non-resonance method*, International Standards Organization, Genève.
- ISO 7253 1996. *Paints and varnishes - Determination of Resistance to Neutral Salt Spray (fog)*, International Standards Organization, Genève.
- ISO 14125 1998. *Fiber-Reinforced Plastic Composites – Determination of Flexural Properties*, International Standards Organization, Genève.
- Kharbari, V.M., Chin, J.W., Hunston, D., Benmokrane, B., Juska, T., Morgan, R., Lesko, J.J., Sorathia, U., Reynaud, D. 2003. Durability Gap Analysis for Fiber-Reinforced Polymer Composites in Civil Infrastructure, *Journal of Composites for Construction*, 7, p. 238-247.
- Nishizaki, I. Meiarashi, S. 2002. Long-Term Deterioration of GFRP in Water and Moist Environment”, *Journal of Composites for Construction*, 6(1), p. 21-27.
- Van de Velde, K., Kiekens, P. 2001. Effects of Chemical Environments on Pultruded E-Glass Reinforced Polyesters, *Journal of Composites Technology & Research*, 23(2), p. 92-101.
- necimento dos perfis de GFRP utilizados na campanha experimental.

7- AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao ICIST, ao LNEC, à ADI (projecto em co-promoção nº 3456/2009) e à FCT pelo financiamento da investigação e também à empresa ALTO, Perfis Pultrudidos, Lda. pelo for-