



QIC2016

2º ENCONTRO NACIONAL SOBRE QUALIDADE E INOVAÇÃO NA CONSTRUÇÃO

Lisboa • LNEC • 21 a 24 de novembro de 2016

DURABILIDADE DE PERFIS PULTRUDIDOS DE GFRP EM APLICAÇÕES ESTRUTURAIS CASO DE ESTUDO SATU-OEIRAS

João Pedro Girão Meireles de Sousa

*Bolseiro de doutoramento, Eng.º Civil, CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa,
joao.meireles.sousa@tecnico.ulisboa.pt*

João Pedro Ramôa Ribeiro Correia

*Professor Associado, Eng.º Civil, CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa,
joao.ramoa.correia@tecnico.ulisboa.pt*

Susana Bravo Cabral da Fonseca

Investigadora Auxiliar, Eng.ª Química, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, sbravo@Inec.pt

Resumo

Os materiais de matriz polimérica reforçada com fibras de vidro (GFRP) constituem uma alternativa interessante às soluções tradicionais em aplicações da construção. Esta comunicação pretende contribuir para melhorar o conhecimento sobre a durabilidade de elementos estruturais de GFRP em condições reais de serviço, através da avaliação de um caso de estudo de uma obra onde foram utilizados dois tipos de perfis pultrudidos de GFRP. A estrutura em estudo, com aproximadamente 11 anos de utilização, encontra-se num ambiente com influência marítima. Analisam-se vários aspectos da durabilidade dos elementos de GFRP da estrutura: (i) as principais anomalias, com base numa inspeção visual; (ii) o comportamento estrutural de elementos de viga após 11 anos em serviço e a comparação com o desempenho inicial e ao fim de 7 anos em serviço; e (iii) as propriedades físicas, mecânicas e estéticas do material GFRP após cerca de 11 anos em serviço e a comparação com as propriedades iniciais.

Palavras-chave: durabilidade, GFRP, perfis pultrudidos, condições de serviço, caracterização experimental.

Introdução

A necessidade de aumentar a velocidade de construção em aplicações da engenharia civil e os problemas de durabilidade evidenciados pelos materiais de construção tradicionais têm fomentado o desenvolvimento de novas soluções construtivas e a utilização de materiais estruturais inovadores. Por outro lado, a regulamentação internacional reflecte uma preocupação crescente com a previsão e a garantia da vida útil das construções.

Neste contexto, na construção de estruturas de edifícios ou pontes, os materiais poliméricos reforçados com fibras de vidro (GFRP) podem trazer vantagens significativas quando comparados com materiais tradicionais (aço ou betão), como sejam a elevada resistência mecânica, o reduzido peso específico, a resistência à corrosão e os reduzidos requisitos de manutenção. Não obstante estas vantagens e o facto de já existirem várias construções de GFRP em serviço, nalguns casos instaladas há vários anos, os estudos sobre o seu desempenho em serviço são ainda limitados. Deste modo, torna-se relevante identificar e avaliar as anomalias e a degradação sofrida por este tipo de materiais e construções.

Actualmente, os perfis pultrudidos são dos componentes em GFRP mais utilizados em pontes e estruturas de edifícios. Como referido, os GFRP são materiais tipicamente associados a um elevado desempenho em termos de durabilidade (Kharbhari; 2007). No entanto, a durabilidade dos GFRP num dado ambiente depende muito da escolha do tipo de matriz. Tipicamente, nos perfis pultrudidos utilizados em aplicações estruturais, recorrem-se a matrizes de poliéster insaturado ou viniléster, juntamente com fibras de vidro E, sendo muito menos frequentemente utilizadas matrizes epóxicas. A durabilidade desta combinação de materiais dependerá das condições ambientais onde estiverem inseridos e da sua agressividade, sendo a humidade, os ciclos térmicos e a radiação ultravioleta (UV) os factores normalmente associados aos processos de degradação (Correia *et al.*; 2006).

Os processos de degradação desenvolvem-se geralmente de uma forma lenta. Assim, poderão decorrer vários anos ou mesmo décadas para que se desenvolva degradação relevante nas estruturas. Desta forma, é frequente recorrer-se a ensaios experimentais acelerados para simular a degradação a longo prazo. No entanto, os resultados deste tipo de ensaios são muito dependentes dos esquemas de ensaio e apresentam resultados por vezes contraditórios (Kharbhari; 2007). A extrapolação de resultados de curto prazo para períodos mais longos (várias décadas) tem limitações, uma vez que ainda não foi desenvolvida uma correlação consistente e exaustiva entre os envelhecimentos artificiais acelerados e o envelhecimento natural. A grande quantidade de parâmetros envolvidos no envelhecimento natural e as suas complexas interações dificulta a sua simulação e previsão. Por exemplo, num estudo que tenta comparar o envelhecimento acelerado de perfis pultrudidos de GFRP expostos a radiação UV, ciclos de temperatura e humidade (em câmara de QUV) durante 3000 horas com 42 meses de envelhecimento natural em Lisboa não foi possível identificar uma correlação clara entre os dois tipos de envelhecimento (Sousa *et al.*; 2013).

Estas limitações reforçam a importância dos estudos sobre os efeitos do envelhecimento natural em estruturas com componentes em GFRP. No entanto, ainda existe muito pouca informação disponível a este nível, como se descreve no parágrafo seguinte.

Alampalli (2006) realizou ensaios de carga e uma inspecção visual a uma ponte em FRP após um período de 4 anos de utilização em Nova Iorque. Os resultados dos ensaios de carga indicaram que a estrutura apresentou bom desempenho, tendo-se registado deslocamentos e extensões inferiores às previstas em dimensionamento. O autor concluiu que o dimensionamento do tabuleiro poderia ter sido optimizado, para garantir uma redução de custos. Na inspecção visual observaram-se algumas delaminações na parte inferior do tabuleiro e dano no revestimento superficial. Farhey (2005) acompanhou de forma contínua, durante 4 anos, uma ponte inteiramente compósita em Ohio. As extensões monitorizadas em vários pontos da ponte foram satisfatórias, não demonstrando degradação. De um modo geral, o comportamento estrutural ao longo do tempo foi consistente e dentro dos parâmetros de dimensionamento. Na inspecção visual também não foram notados sinais visíveis de degradação nas superfícies expostas.

Os dois estudos acima referidos incluíram um período de observação muito reduzido para retirar conclusões sobre o comportamento das respectivas construções durante toda a sua vida útil. Nishizaki *et al.* (2015) realizaram um estudo sobre a durabilidade de placas pultrudidas de GFRP com

três sistemas de laminados diferentes, com percentagem de fibras de reforço longitudinal variável (12%, 26% e 43%). Os autores mediram diferenças no desempenho mecânico em tracção de provetes retirados das placas ao final de 1 e de 10 anos de exposição a envelhecimento natural em Tsukuba, Japão. Após 10 anos, os dois sistemas com menor volume de fibras registaram reduções de cerca de 17% na resistência à tracção e aumentos de cerca de 4% no módulo de elasticidade. Já os provetes com maior percentagem de fibras longitudinais apresentaram aumentos na resistência e no módulo de elasticidade de 7% e 29% respectivamente. As mudanças após 1 ano foram muito pouco relevantes. Klamer *et al.* (2015) observaram os efeitos em placas de GFRP expostas durante 13 anos a condições de humidade e água em ambiente exterior em Werkendam, Holanda. Os autores caracterizaram placas colocadas num pontão, submersas e acima do nível da água. Não tendo especificado o processo de fabrico, os autores referem um teor em fibras relativamente reduzido comparado com a pultrusão. As placas que estavam expostas acima do nível de água, não estando por isso sujeitas a degradação por contacto directo com a água, foram as que apresentaram menor degradação. No entanto, à excepção da resistência ao corte interlaminar, todas as propriedades mecânicas sofreram uma redução. A resistência à tracção apresentou reduções entre 16% e 33% para as placas acima e abaixo do nível de água, respectivamente. O módulo de elasticidade em tracção apresentou menores variações, entre 7% e 10% para o mesmo tipo de placas. Já Keller *et al.* (2015) avaliaram o envelhecimento natural em componentes pultrudidos em GFRP numa estrutura de um edifício e de uma ponte pedonal após 15 e 17 anos de serviço, respectivamente. Foi realizada uma inspecção detalhada (a ambas as estruturas), acompanhada de uma campanha de ensaio às condições de serviço, em escala real, e ensaios em provetes para caracterização mecânica (apenas na ponte). A ponte, localizada em Pontresina, está exposta ao ambiente agressivo dos Alpes Suíços e o edifício (*Eyecatcher*) localiza-se em Basileia. Os autores constataram que o desempenho mecânico dos perfis da ponte foi afectado de modo significativo pela presença combinada de ciclos térmicos e forte radiação UV, especialmente no banzo superior dos perfis – reduções da resistência à tracção de 32% nos banzos e 17% na alma. No entanto, o módulo de elasticidade em tracção registou pequenas variações – 2% nos banzos e 5% na alma. A radiação UV foi também responsável pelo aparecimento de fibras à vista nas superfícies (*fibre blooming*). Na estrutura do edifício foram identificadas mudanças de cor perto das ligações aparafusados dos perfis, relacionadas com a sensibilidade destas zonas à incorporação de humidade. Com base nos resultados obtidos, os autores recomendam o uso de sistemas de protecção superficial em estruturas de GFRP expostas a condições ambientais adversas.

Nesta comunicação, é investigada a durabilidade dos componentes de GFRP instalados num caso de estudo – o Sistema Automático de Transporte (SATU) de Oeiras - após 11 anos de serviço. A investigação incluiu uma inspecção detalhada à estrutura e a análise do desempenho estrutural, mecânico, físico e estético de componentes em GFRP, comparando-se os resultados obtidos com os valores iniciais e após 7 anos de exposição. Alguns resultados são ainda comparados com os obtidos em ensaios de envelhecimento acelerado.

Descrição da obra

O SATU Oeiras foi um sistema de transporte urbano por cabo sobre carris e sem tripulação instalado no concelho de Oeiras, que ligava a estação ferroviária de Paço de Arcos ao Centro Comercial Oeiras Parque. Foi inaugurado em 2004 e encerrado em 2015. As componentes relevantes para o estudo em questão fazem parte da subestrutura de apoio ao tabuleiro do viaduto ferroviário. Esta subestrutura (Figura 1) permite o acesso pedonal à parte superior do tabuleiro e é constituída por elementos de GFRP – gradis moldados de GFRP e duas tipologias de perfis pultrudidos de GFRP, dispostos longitudinal (I100) e transversalmente (I150).

Todo o material foi fornecido pela Sociedade Técnica de Estruturas Pultrudidas (*STEP*), tendo sido produzido pelas empresas *Nantong Shirui* (gradis) e *TOP GLASS* (perfis). As ligações entre os perfis, os gradis e a estrutura em betão foram realizadas através de ligações aparafusadas e cantoneiras em GFRP. Foi realizada uma inspecção visual aos componentes em GFRP, tendo sido posteriormente removidos 6 elementos (3 vigas de cada tipologia) para caracterização estrutural e avaliação das características do material, que foram substituídos por novos elementos. Os gradis também foram analisados, embora o seu estudo se encontre fora do âmbito desta comunicação.

Inspeção e observação da estrutura

Em Fevereiro de 2016, foi realizada uma inspeção visual da zona inferior do SATU Oeiras, nomeadamente da parte mais próxima de Paço de Arcos, por ser a mais influenciada pelo ambiente marítimo. Foram identificados alguns tipos de anomalias nas componentes em GFRP, que são ilustradas na Figura 2.



Figura 1: Estrutura do SATU Oeiras.

De entre as anomalias verificadas, as que mais se destacaram foram as marcas superficiais, algumas provavelmente provenientes da fase de fabrico e as restantes da fase de utilização. Este foi o tipo de anomalia encontrado com mais frequência nos perfis. Também foi notada a presença de colonização biológica e corrosão de alguns elementos metálicos de ligação. Já com menor relevância, foram também detectadas, de uma forma pontual, indentações em alguns elementos, devido a erros de operação durante a instalação, bem como algumas manchas.

A perda de brilho e o *fibre blooming*, que costumam ser anomalias frequentes nestas estruturas, não apresentaram expressão relevante. De facto, os perfis encontram-se instalados na parte inferior do tabuleiro, estando desta forma protegidos da exposição solar (o principal factor de degradação responsável pelo aparecimento desta anomalia) pelos gradis.



Figura 2: Anomalias: (a) marcas superficiais; (b) colonização biológica e corrosão de elementos metálicos nas ligações; (c) indentação num perfil transversal de travamento

De uma forma geral, os elementos apresentaram anomalias com pouca relevância e um bom estado de conservação. Deste modo, são apenas necessárias pequenas intervenções de manutenção.

Caracterização do comportamento estrutural das vigas

Elementos ensaiados

A caracterização estrutural envolveu a realização de ensaios de flexão de vigas pultrudidas com diferentes secções transversais em I, com alturas nominais (H) de 100 mm (I100) e 150 mm (I150) e comprimento (L) de 2.40 m (I100) e 3.60 (I150). As dimensões das secções transversais das seis vigas ensaiadas são apresentadas no Quadro 1, em que e é a espessura da alma, e B e t

correspondem respectivamente à largura e à espessura dos banzos. As dimensões das vigas foram medidas com recurso a uma fita métrica graduada (em mm) e a uma craveira digital *Mitutoyo*, modelo *CD-15D*, com resolução de 0.01 mm.

Quadro 1: Dimensões das secções transversais das vigas

Viga	L [m]	H [mm]	e [mm]	Banzo superior		Banzo inferior	
				B [mm]	t [mm]	B [mm]	t [mm]
I100-V1	2.41	100.52	6.16	50.08	6.77	50.02	6.83
I100-V2	2.43	100.69	6.21	50.14	6.73	50.23	6.89
I100-V3	2.45	100.11	6.30	50.04	6.96	50.04	6.78
I150-V1	3.68	149.72	9.10	75.33	8.36	75.45	8.54
I150-V2	3.73	150.14	8.39	75.00	8.62	74.97	8.76
I150-V3	3.68	150.22	8.09	75.34	8.15	75.19	8.15

Metodologia de ensaio

Foram realizados ensaios à flexão até à rotura nas vigas das duas tipologias de acordo com o anexo D da norma europeia (EN 13706-2:2002). As vigas foram apoiadas nas duas extremidades e submetidas a uma carga concentrada, P , aplicada a meio vão, tendo sido utilizado um pórtico metálico fechado para o efeito. O esquema de ensaio encontra-se ilustrado na Figura 3. Faz-se notar que foi utilizado um sistema de travamento lateral na zona dos apoios, visível na mesma figura, impedindo deste modo as rotações de torção nas extremidades das vigas. Este sistema foi utilizado de modo a compatibilizar estes ensaios com os realizados em campanhas anteriores no mesmo tipo de vigas. Os ensaios das vigas foram efectuados com controlo do deslocamento vertical a meio vão, s , pelo menos até ser atingida a força última dos elementos em questão. A duração média dos ensaios até ser atingida a força máxima foi cerca de 6 minutos nas vigas I150 e 4 minutos nas vigas I100. Os ensaios foram realizados com recurso a uma célula de carga da marca *Novatech*, com capacidade de 200 kN. Para aplicação da carga, foi utilizado um macaco hidráulico da marca *Enerpac*, com 300 kN de capacidade e 125 mm de curso. Foram utilizados três transdutores de deslocamento com 10 mm de curso (para monitorizar eventuais deformações no pórtico de carga) e outro com 100 mm de curso (para medir os deslocamentos das vigas), todos da marca *TML*. Para o registo dos valores da força e dos deslocamentos ao longo do ensaio, foi utilizado um sistema de aquisição de dados da marca *HBM*, modelo *QuantumX*.

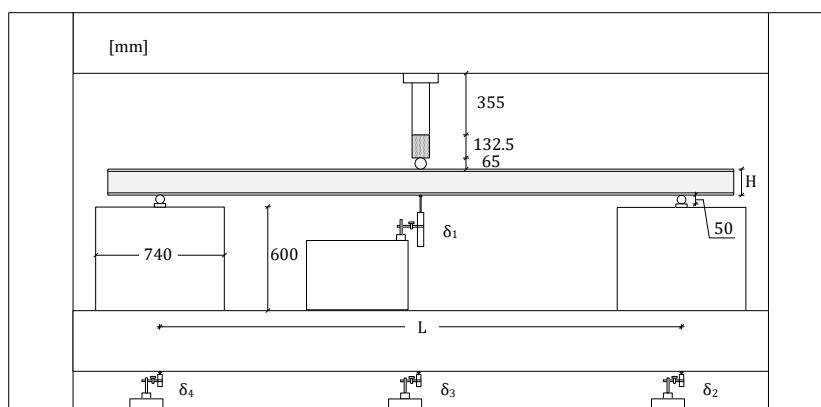


Figura 3: Esquema de ensaio utilizado nos ensaios das vigas, sem travamento lateral.

As vigas I150 foram também sujeitas ao ensaio indicado no anexo G da norma já referida (EN 13706-2:2002), que permite determinar a rigidez efectiva de flexão e de corte do elemento, assumindo um comportamento isotrópico do material GFRP. Este ensaio, sendo não destrutivo, foi efectuado previamente ao ensaio à rotura. De acordo com este método, foram efectuados ensaios de flexão em

elementos de viga simplesmente apoiados, de vão variável, em que se registou a força e o deslocamento a meio vão. Foram ensaiados 5 vãos para cada uma das três vigas I150, dois de valor superior e dois de valor inferior ao vão crítico estimado. Este vão corresponde às condições de apoio (vão) para as quais a deformação por corte corresponde a 12% da deformação total.

Resultados e discussão

Na Figura 4 apresenta-se a força em função do deslocamento vertical obtido nos ensaios de flexão das vigas I100 e I150.

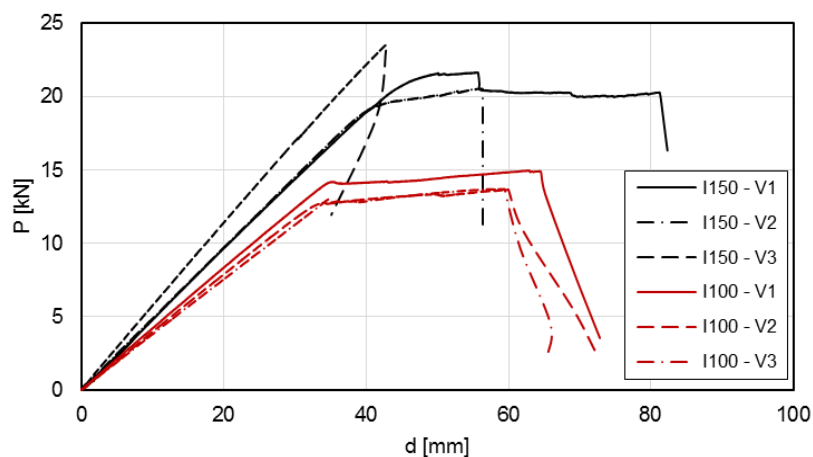


Figura 4: Resultados obtidos nos ensaios à rotura das vigas

As três vigas I100 apresentaram um comportamento semelhante até à rotura, nomeadamente um comportamento linear até ao início da sua instabilidade lateral. A viga I100-V1 apresentou uma rigidez inicial mais elevada e também um valor maior de força máxima comparativamente às restantes. Nesta viga, salienta-se ainda que ocorreu uma pequena redução de força, para um deslocamento a meio vão de cerca de 35 mm, antes do início da instabilidade lateral; tal correspondeu a um pequeno esmagamento na zona de aplicação de carga.

As vigas I150 apresentaram um comportamento semelhante no troço elástico linear, embora a viga I150-V3 se tenha mostrado mais rígida e apresentado maior força máxima. No entanto, em termos de instabilidade lateral, as três vigas revelaram comportamentos ligeiramente diferentes. A viga I150-V3 não apresentou um patamar de deslocamento vertical aproximadamente constante, tendo exibido uma rotura frágil. Por outro lado, na viga I150-V1 verificou-se um patamar daquele tipo relativamente extenso devido às elevadas rotações na secção de meio vão, enquanto a viga I150-V2 apresentou um comportamento intermédio. É de notar ainda uma perda marginal de força na viga I150-V1, que correspondeu à ocorrência de fissuração a cerca de 35 cm da zona de meio vão.

Relativamente aos modos de rotura, apresentados na Figura 5(a), verificou-se que as vigas I100 instabilizaram por mecanismos de flexão lateral-torção. Estes mecanismos encontraram-se associados a valores elevados das rotações na zona central das vigas, resultantes da sua flexão lateral e torção e das deformações associadas a este fenómeno de instabilidade. As elevadas deformações provocaram um esmagamento do banzo superior (comprimido), tendo ocorrido roturas interlaminares nessas zonas (nas três vigas) e a abertura de uma fenda aproximadamente a 45° a distâncias da zona de aplicação de carga que variaram entre 22.5 e 32.5 cm nas diferentes vigas.

Na viga I150-V1 (Figura 5(b)) foi possível constatar claramente que as elevadas rotações na secção de meio vão decorrentes do fenómeno de instabilidade provocaram uma excentricidade no ponto de aplicação de carga, da qual resultou um modo de colapso por corte na zona de ligação banzo-alma na direcção longitudinal, no ponto de aplicação de carga. Ocorreram também fissuras a meia altura do banzo superior provocadas por delaminação. A viga I150-V2, apresentou um modo de rotura semelhante, embora para menores rotações da secção. A viga I150-V3, que não instabilizou, apresentou um modo de rotura por esmagamento do banzo comprimido, provocando fissuração na

zona de ligação banzo-alma. Os modos de rotura observados foram consistentes com os resultados de ensaios realizados previamente a perfis do mesmo tipo (NT-NCE 17/04; 2004).

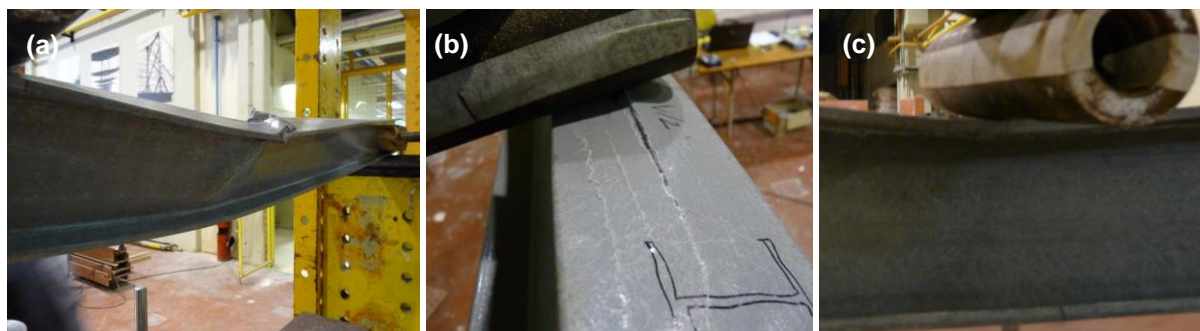


Figura 4: Modos de rotura: (a) vigas I100; (b) viga 150-V1/V2; (c) viga I150-V3

No Quadro 2 apresenta-se os valores do módulo de elasticidade aparente em flexão, E_{app} , da força máxima registada, P_{max} , do deslocamento vertical associado, d_{max} (ensaio à rotura), e dos módulos de elasticidade e de distorção efectivos (ensaio de vãos variáveis), E_{eff} e G_{eff} , respectivamente, calculados de acordo com a EN 13706-2, para as duas tipologias de vigas. Note-se que E_{app} corresponde ao valor do módulo de elasticidade obtido no ensaio a partir do declive da curva força-deslocamento considerando apenas a deformabilidade por flexão, acrescido de um factor de 1.05, por forma a considerar, de forma simplificada, o efeito da deformabilidade por corte.

Quadro 2: Resultados dos ensaios de flexão às vigas

Viga	E_{ap} [GPa]	P_{max} [kN]	d_{max} [mm]	E_{eff} [GPa]	G_{eff} [GPa]
I100-V1	39.8	15.0	62.9		
I100-V2	37.9	13.7	59.9		
I100-V3	36.5	13.7	59.3		
I100-V _{med}	38.0 ± 1.6	14.1 ± 0.7	60.7 ± 1.9		
I150-V1	35.6	21.7	55.1	39.7	3.0
I150-V2	34.8	20.6	59.7	37.9	3.9
I150-V3	43.3	23.6	42.8	43.4	3.5
I150-V _{med}	37.9 ± 4.7	21.9 ± 1.5	52.5 ± 8.7	40.3 ± 2.8	3.5 ± 0.4

A análise dos resultados obtidos para as vigas I100 permite constatar que os valores do módulo de elasticidade aparente em flexão apresentaram uma dispersão relativamente reduzida (coeficientes de variação máximos na ordem dos 5%). Nota-se ainda a já referida diferença entre os resultados obtidos para a viga I100-V1 face às restantes, tendo-se obtido naquela maiores valores de força máxima e módulo de elasticidade. Nas vigas I150 constatou-se que os valores do módulo de elasticidade em flexão apresentaram uma dispersão mais significativa. Tal facto poderá dever-se à viga I150-V3 (a que não instabilizou lateralmente), que apresentou valores mais elevados de rigidez. Os valores obtidos para o módulo de flexão efectivo E_{eff} foram ligeiramente superiores aos do módulo de flexão aparente (com excepção da viga I150-V3), decorrendo tal diferença dos métodos utilizados para a sua utilização (teoria de vigas de Timoshenko no caso de E_{eff} e teoria de vigas de Euler-Bernoulli no caso de E_{app}).

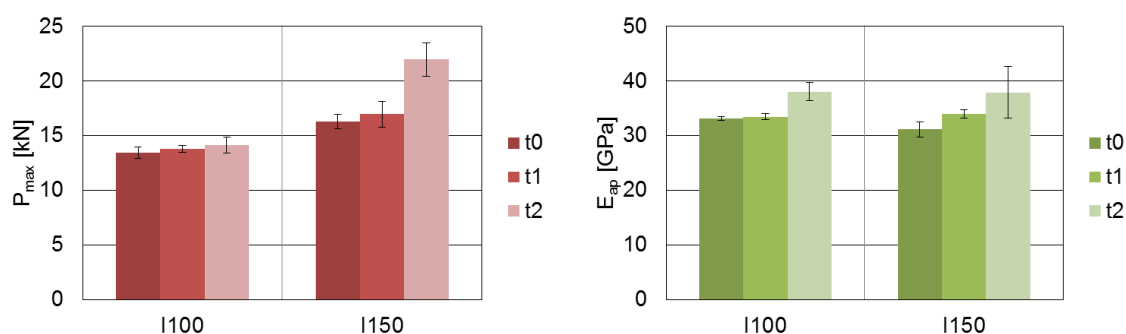
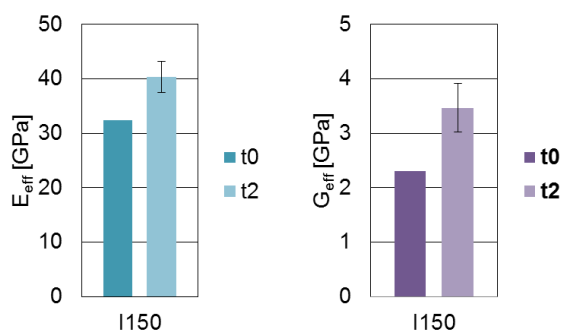
Com base nos resultados obtidos e através de dados de ensaios efectuados anteriormente em perfis semelhantes por Sá (2007) e pelo LNEC (NT-NCE 17/04; 2004) (NT-DE/NCE 75/10; 2010), foi possível analisar a evolução das propriedades destes perfis ao longo do tempo de serviço. Os valores em questão apresentam-se no Quadro 3 e na Figura 5.

Através da análise dos resultados apresentados no Quadro 3 e esquematizados nas Figuras 5 e 6 foi possível constatar que as propriedades mecânicas consideradas para as vigas em análise apresentaram bom desempenho ao longo de 11 anos de utilização em condições de serviço. De facto, para as vigas I100 observou-se uma tendência crescente em ambas as propriedades monitorizadas (P_{max} e E_{ap}), que apresentaram valores máximos para o último período, com a maior

diferença registada neste último ensaio, onde aqueles valores aumentaram 5.2% e 14.7%, respectivamente, em relação aos valores iniciais. Comparando as mesmas grandezas em relação às vigas I150, nota-se a mesma tendência crescente, mas de uma maneira mais expressiva. Neste caso, a variação observada para os valores de P_{max} e E_{ap} é de 34.8% e 21.8%, respectivamente. Comparando os resultados das grandezas efectivas com os resultados obtidos por Sá (2007), também é identificada esta mesma tendência crescente.

Quadro 3: Propriedades mecânicas das vigas em função do tempo

Viga	Propriedade	Ref.	t_0 (0 anos)	Ref.	t_1 (7 anos)	Ref.	t_2 (11 anos)
I100	P_{max} [kN]	(NCE;2004)	13.4 ± 0.6	(NCE;2010)	13.8 ± 0.3	(autores;2016)	14.1 ± 0.7
	E_{ap} [GPa]		33.2 ± 0.3		33.5 ± 0.5		38.1 ± 1.6
I150	P_{max} [kN]		16.3 ± 0.7		17.0 ± 1.2		21.9 ± 1.5
	E_{ap} [GPa]		31.1 ± 1.4		33.9 ± 0.8		37.9 ± 4.7
	E_{eff} [GPa]	(Sá;2007)	32.4				40.3 ± 2.8
	G_{eff} [GPa]		2.3				3.5 ± 0.4

Figura 5: Alterações em P_{max} e E_{ap} em função do tempoFigura 6: Alterações em E_{eff} e G_{eff} em função do tempo

Esta melhoria de desempenho deverá estar associada à ocorrência de fenómenos de pós-cura, devida à reticulação contínua sofrida pelos materiais poliméricos que constituem a matriz destes perfis. Deste modo, estes fenómenos não só “camuflam” uma eventual degradação destas propriedades, mas ainda contribuem para um aumento do desempenho mecânico. Estes processos de pós-cura foram bastante bem identificados em várias investigações, ocorrendo de forma frequente em materiais semelhantes aos ensaiados no presente estudo (Correia *et al.*; 2006; Sousa *et al.*; 2013). Salienta-se ainda que existiu maior dispersão nos resultados obtidos para tempos de serviço mais elevados. Este facto pode estar relacionado com algumas diferenças nos diâmetros dos sistemas de apoio e do ponto de aplicação de carga, que foram semelhantes mas não exactamente iguais aos ensaios realizados para períodos de envelhecimento inferiores (t_0 e t_1).

Caracterização do material dos perfis GFRP

Materiais e métodos

Foram preparados provetes de dimensões adequadas, para caracterização das propriedades físicas, estéticas e mecânicas, com recurso a uma serra diamantada arrefecida a água, obtidos dos perfis I150 já descritos acima. Pelo facto de os dois perfis analisados apenas diferirem nas dimensões, resolveu-se efectuar o estudo apenas no que apresenta altura superior, devido à maior facilidade de obtenção de provetes, obtidos da alma das vigas. Após o corte, os provetes foram armazenados em recipientes hermeticamente selados e colocados numa sala com a temperatura controlada $23(\pm 2)$ °C, até serem ensaiados. Foram realizados ensaios de caracterização de propriedades mecânicas, físicas e estéticas aos provetes.

A caracterização mecânica foi efectuada na direcção longitudinal com recurso a: (i) ensaio das propriedades em tracção; e (ii) ensaio das propriedades em flexão. As propriedades em tracção foram determinadas de acordo com a norma ISO 527-1/4 (2012/1997) em provetes de dimensões rectangulares com 250 mm x 20 mm x 8 mm. Os ensaios foram efectuados numa máquina de ensaios universal *Instron* com capacidade de carga de 100 kN e a uma velocidade de 2 mm/min. Os ensaios de flexão foram efectuados de acordo com a norma ISO 14125 (1998) em provetes rectangulares com 164 mm x 15 mm x 8 mm. O vão utilizado foi de 16 vezes o valor da espessura; o equipamento e a velocidade mantiveram-se iguais ao ensaio anterior.

A caracterização física foi realizada através do ensaio de resistência ao choque Charpy, de acordo com o método descrito na norma ISO 179-1 (2010). Foi utilizada uma máquina de ensaios de choque pendular com uma capacidade de 50 J e um martelo Charpy com 15 J de capacidade. Os provetes foram cortados com as dimensões de 12 mm x 106 mm x 8 mm e o vão de ensaio foi de 66 mm. A velocidade de impacto foi de 3.8 m/s.

Considerando a caracterização estética, foram avaliadas alterações de cor em provetes com dimensões idênticas aos utilizados para a determinação das propriedades em tracção, de acordo com a parte 1 e 2 da norma ISO 7724 (1984), utilizando o sistema CIE 1976. Os testes foram realizados num colorímetro *Macbeth Coloreye 3000*, utilizando o modo de reflectancia com a componente especular excluída e a energia UV do espectro incluída. Foi ainda utilizado o iluminante D65, a geometria d/8 e o observador de referência a 10°.

Resultados e discussão

Propriedades mecânicas

A Figura 7 representa os modos de rotura observados nos ensaios de tracção e flexão realizados. Todos os ensaios revelaram comportamento elástico linear até a rotura, conforme esperado para este tipo de materiais. No ensaio de tracção a rotura ocorreu pela camada exterior das fibras de reforço, seguida por delaminação das camadas de fibras. Já no ensaio de flexão, a rotura ocorreu pela camada mais exterior de fibras e matriz, a que seguiu a rotura das fibras de reforço longitudinal. Os provetes não envelhecidos apresentaram o mesmo modo de rotura.

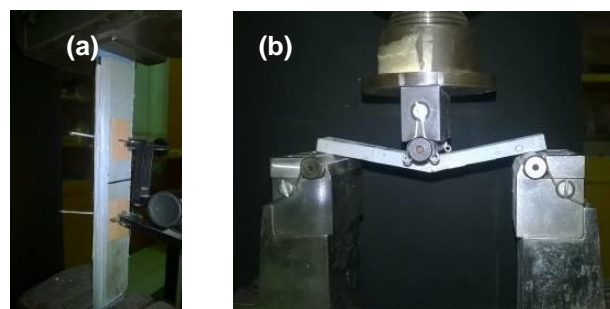


Figura 7: Modos de rotura observados nos ensaios: (a) de tracção e (b) de flexão

O Quadro 4 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização mecânica, após 11 anos em serviço e sua comparação com os resultados iniciais e após 2000 h de envelhecimento acelerado em câmaras de QUV e de arco de Xénon (R125-DM/NMPC; 2004). Neste quadro, σ_{tu} é a resistência à tracção, ε_{tu} a extensão associada ao ponto de tensão máxima e E_t o módulo de elasticidade em tracção. As restantes propriedades são análogas às referidas para o ensaio de tracção, mas em relação as características em flexão.

Quadro 4: Propriedades em tracção e flexão dos materiais de GFRP

Propriedade	Ref.	t ₀ (0 anos)	QUV 2000h	Xénon 2000h	Ref.	t ₂ (11 anos)
σ_{tu} [MPa]	(NMPC,2004)	431.6 ± 14.9	412.6 ± 28.8	375.0 ± 10.8	(autores;2016)	385.3 ± 10.8
ε_{tu} [-]		0.013 ± 0.001	0.013 ± 0.001	0.012 ± 0.001		0.012 ± 0.001
E_t [GPa]		34.2 ± 1.4	34.8 ± 1.0	32.9 ± 0.6		34.2 ± 0.6
σ_{fu} [MPa]		511.4 ± 7.2	496.4 ± 28.4	491.8 ± 15.1		471.5 ± 15.9
ε_f [-]		0.023 ± 0.001	0.022 ± 0.001	0.022 ± 0.001		0.021 ± 0.001
E_f [GPa]		23.7 ± 1.0	23.2 ± 1.0	23.7 ± 0.6		23.3 ± 0.2

Através da análise do Quadro 4 é possível constatar que a resistência à tracção e a resistência à flexão sofreram alterações consideráveis no seu valor resistente (10.7% e 7.8%, respectivamente). Comparando com resultados de envelhecimentos acelerados, a degradação sofrida por envelhecimento numa câmara de arco de Xénon durante 2000 horas foi a que produziu níveis de degradação mais comparáveis aos resultados obtidos. Por outro lado, os módulos de elasticidade e as extensões na rotura não sofreram alterações significativas ao longo do tempo. De uma forma geral, as mudanças observadas neste tipo de caracterização foram muito reduzidas a moderadas.

Propriedades físicas

Na Figura 8 apresenta-se um aspecto do tipo de rotura parcial obtida com os provetes retirados do perfil e sujeitos ao ensaio de choque Charpy. Os provetes não envelhecidos apresentaram o mesmo modo de rotura.



Figura 8: Modos de rotura parcial observado no ensaio de choque Charpy

No Quadro 5 apresentam-se os resultados do ensaio da resistência ao choque Charpy e sua comparação com os resultados iniciais.

Quadro 5: Resistência ao choque de Charpy

Propriedade	Ref.	t ₀ (0 anos)	Ref.	t ₂ (11 anos)
Energia [J]	(NMPC;2004)	26.73 ± 2.69	(autores;2016)	14.86 ± 1.42
Tipo de rotura		parcial		parcial
Resistência ao choque [kJ/m ²]		315 .1± 34.0		144.7 ± 11.5

A análise dos resultados apresentados no Quadro 5 mostra uma perda de mais de metade (54%) do valor da resistência ao choque do material envelhecido em condições de serviço. No entanto, apenas foram ensaiados 5 provetes num ensaio que é muito dependente da sua geometria e de onde são retirados. Estes poderão ter sido provenientes de uma zona fragilizada, influenciando assim os

resultados. Note-se que numa fase posterior deste estudo está prevista a repetição deste ensaio abrangendo um maior número de provetes.

Propriedades estéticas

No Quadro 6 apresentam-se os resultados do ensaio de determinação da diferença de cor apresentada pelos materiais após os envelhecimentos a que estiveram sujeitos.

Quadro 6: Propriedades colorimétricas dos perfis de GFRP

Propriedade	Ref.	t ₀ (0 anos)	QUV 2000h	Xénon 2000h	Ref.	t ₂ (11 anos)
L*	(NMPC;2004)	62.48	68.67	70.19	(autores;2016)	64.72
a*		-2.01	-3.52	-3.30		-2.7
b*		-3.2	8.71	5.41		2.7
ΔE^*			13.23	10.53		6.31

Através da análise dos resultados apresentados no Quadro 6 verificou-se que os envelhecimentos artificiais foram mais agressivos, alterando de um modo mais acentuado a cor dos perfis. Embora os perfis expostos a condições de envelhecimento natural tenham sofrido alterações na cor da mesma forma que os restantes envelhecimentos, notando-se um amarelecimento e uma cor mais esverdeada, a sua variação foi mais moderada. Apesar de menos acentuada, a variação de cor que se observou no material sujeito ao envelhecimento natural já foi perceptível por observação visual.

Conclusões

Os resultados do trabalho experimental desenvolvido com o objectivo de contribuir para o aumento do conhecimento da durabilidade de perfis pultrudidos de GFRP em condições de serviço permite tecer as seguintes considerações:

1. De forma geral, os componentes GFRP em estudo, após 11 anos de exposição ambiental em condições de serviço, sujeitos a um clima com influência marítima, apresentaram uma degradação muito reduzida a moderada das suas propriedades mecânicas e do seu desempenho estrutural, exceptuando a resistência ao choque Charpy.
2. Através da inspecção visual realizada, foi possível observar a existência de marcas superficiais com bastante frequência e, também, a existência local de colonizações biológicas e corrosão de elementos metálicos.
3. Na caracterização estrutural dos elementos ensaiados, não foi observada degradação nas propriedades monitorizadas. De facto, as forças de rotura, os módulos de elasticidade e distorção apresentaram uma tendência crescente ao longo do tempo. Tal estará associado a fenómenos de pós-cura da matriz polimérica, bem conhecidos neste tipo de materiais.
4. Na caracterização realizada ao material GFRP, as propriedades mecânicas indicaram níveis de degradação entre 8 a 10% ao nível da resistência à flexão e à tracção. Já as restantes propriedades apresentaram níveis de degradação desprezáveis.
5. A resistência ao choque Charpy apresentou degradação muito significativa para cerca de 54% do valor inicial.
6. No que se refere às propriedades estéticas, ocorreu uma variação moderada de cor que, no futuro, poderá justificar a realização de acções de manutenção aos perfis.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o apoio das instituições CERIS, LNEC e FCT pelo apoio dado a esta investigação e também à Câmara Municipal de Oeiras e às empresas STEP e Teixeira Duarte pela disponibilidade demonstrada durante a execução dos trabalhos. O primeiro autor gostaria ainda de agradecer à FCT pelo financiamento concedido através da sua bolsa de doutoramento (bolsa nº SFRH/BD/88467/2012).

Referências bibliográficas

- ALAMPALLI, S., 2006 – **Field performance of an FRP slab bridge**. *Composite Structures*, 72(4), pp. 494-502.
- CORREIA, J. R., CABRAL-FONSECA, S., BRANCO, F. A., FERREIRA, J.G., EUSÉBIO, M.I., RODRIGUES, M.P., 2006 - **Durability of pultruded glass fiber-reinforced polyester profiles for structural applications**. *Mechanics of Composite Materials*, 42(4), pp. 325-338.
- EN 13706-2, 2002 – **Reinforced plastics composites - Specifications for pultruded profiles - Part 2: Methods of test and general requirements**. Brussels, Comité Européen de Normalisation (CEN).
- FARHEY, D. N., 2005 – **Long-term performance monitoring of the tech 21 all-composite bridge**. *Journal of Composites for Construction*, 9(3), pp 255-262.
- ISO 7724:1984 – **Paints and varnishes – Colorimetry - Part 1: Principles, Part 2: Colour measurement**. Genève, International Organization for Standardization (ISO).
- ISO 14125:1998 – **Fibre-reinforced plastic composites - determination of flexural properties**. Genève, International Organization for Standardization (ISO).
- ISO 179-1:2010 – **Plastics – Determination of Charpy impact properties. Part 1: Non-instrumented impact test**. Genève, International Organization for Standardization (ISO).
- ISO 527-1/4:2012/1997 – **Plastics - determination of tensile properties - Part 1: general principles, Part 4: test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites**. Genève, International Organization for Standardization (ISO).
- KARBHARI, V. M., 2007 – **Durability of composites for civil structural applications**. Woodhead Publishing, Boca Raton, Florida.
- KELLER, T., THEODOROU, N. A., VASSILOPOULOS, A.P., DE CASTRO, J., 2015– **Effect of Natural Weathering on Durability of Pultruded Glass Fiber-Reinforced Bridge and Building Structures**. *Journal of Composites for Construction*, 20(1), pp 1-9.
- KLAMER, E., TROMP, L., DE BOER, A., NIJSSEN, R., 2015 – **Long-term effects of wet and outdoor conditions on GFRP**. *Conference Proceedings, IABSE Conference – Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges*, pp. 1591-1598.
- NISHIZAKI, I., SAKURABA, H., TOMIYAMA, T., 2015 – **Durability of Pultruded GFRP through Ten-Year Outdoor Exposure Test**. *Polymers*, 7, pp. 2494-2503.
- NT-NCE 17/04, 2004 – **Estudo experimental das características resistentes de vigas e grelhas em plástico reforçado com fibra de vidro**. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Núcleo de Comportamento de Estruturas, pp 1-14.
- NT-DE/NCE 75/10, 2010 – **Avaliação experimental da resistência de vigas e grelhas de plástico reforçado com fibra de vidro**. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Núcleo de Comportamento de Estruturas, pp 1-14.
- R125-DM/NMPC, 2004 – **Caracterização de materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de vidro**. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Núcleo de Materiais Plásticos e Compósitos, pp. 1-50.
- SÁ, M., 2007 – **Comportamento Mecânico e Estrutural de FRP - Elementos Pultrudidos de GFRP**. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, pp. 148-194.
- SOUSA, J. M., CORREIA, J., CABRAL-FONSECA, S., 2013 – **Durability of Glass Fibre Reinforced Polymer Pultruded Profiles: Comparison Between QUV Accelerated Exposure and Natural Weathering in a Mediterranean Climate**. *Experimental Techniques*, 40(1) pp. 207-219.