Comportamento monotónico e cíclico de pórticos pultrudidos em compósito fibra-polímero

Monotonic and cyclic behaviour of pultruded fibre reinforced polymer composite frames

> David Martins José Gonilha João R. Correia Nuno Silvestre Luís Guerreiro

Resumo

Apresenta-se um estudo experimental e numérico sobre o comportamento guase-estático de pórticos, constituídos por perfis pultrudidos em compósito de fibras de vidro-polímero, sujeitos a ações laterais, monotónicas e cíclicas. Foram testados dois tipos de ligação viga-coluna, um sistema de contraventamento, materializado por cabos, e uma parede divisória leve. Os ensaios monotónicos mostraram que as ligações viga-coluna têm grande influência na resposta global dos pórticos, nomeadamente na sua rigidez. A introdução do contraventamento ou da parede aumentou a rigidez e resistência dos pórticos. Por outro lado, nos ensaios cíclicos, a introdução destes elementos conduziu a um comportamento histerético deficiente. Por fim, o comportamento dos pórticos foi simulado através de modelos de elementos finitos, adoptando molas não-lineares para simular as ligações viga-coluna. Após validação com os resultados experimentais, introduziu-se um sistema dissipador do tipo "ADAS", mostrando-se que será possível melhorar significativamente o desempenho sísmico destas estruturas.

Abstract

This paper presents an experimental and numerical investigation on the quasi-static behaviour of pultruded glass-fibre reinforced polymer frame structures, under monotonic and cyclic horizontal loading. In these tests, the following parameters were investigated: two different beam-to-column connections, one bracing system, and one light partition wall. Monotonic tests showed that the beam-to-column connections have a great influence on the overall behaviour of the frames, namely in their stiffness. As expected, the addition of bracings or partition walls increased the stiffness and strength. On the other hand, in the cyclic tests, the addition of these components led to a poor hysteretic behaviour. The behaviour of the frame specimens was simulated with finite element models, with non-linear joints to simulate the connections. After validation with experimental data, an "ADAS" dissipation system was introduced, showing that the seismic behaviour of these composite frame structures can be greatly improved.

Palavras-chave: PRFV / Pórticos / Comportamento sísmico / Ensaios experimentais / Modelos de elementos finitos

Keywords: GFRP / Frames / Seismic behaviour / Experimental tests / Finite element models

David Martins

Doutorando CERIS / IST / UL Lisboa, Portugal davidjmmartins@tecnico.ulisboa.pt

José Gonilha

Investigador CERIS / IST / UL Lisboa, Portugal jose.gonilha@tecnico.ulisboa.pt

João R. Correia

Professor Catedrático CERIS / IST / UL Lisboa, Portugal joao.ramoa.correia@tecnico.ulisboa.pt

Nuno Silvestre

Professor Catedrático IDMEC / IST / UL Lisboa, Portugal nsilvestre@tecnico.ulisboa.pt

Luís Guerreiro

Professor Associado CERIS / IST / UL Lisboa, Portugal luis.guerreiro@tecnico.ulisboa.pt

Aviso legal

Os conteúdos incluídos na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The contents included in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

MARTINS, D. [*et al.*] – comportamento monotónico e cíclico de pórticos pultrudidos em compósito fibra-polímero. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 22. ISSN 2183-8488. (julho 2023) 19-30.

1 Introdução

Os materiais compósitos em polímero reforçado com fibra têm vindo a ganhar destaque como alternativa aos materiais estruturais tradicionais [1-4], devido à sua elevada resistência e leveza. Devido ao seu custo mais reduzido, os perfis pultrudidos em compósito de polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP, sigla inglesa), em particular, têm-se tornado cada vez mais competitivos, quer para a reabilitação, quer para construção nova [4,5].

Por outro lado, os seus modos de rotura frágil [6,7], em claro contraste com as filosofias de dimensionamento dominantes, levantam preocupações, justificadas, sobre a sua utilização em zonas sísmicas. Estas preocupações são agravadas pela falta de recomendações de dimensionamento sísmico nas normas disponíveis [8,9]; essa lacuna deve-se, essencialmente, aos poucos estudos efetuados sobre o tema, aspecto recentemente reconhecido pelo *Working Group WG4 do Technical Committee TC250* do CEN [10].

De facto, foram realizados muito poucos estudos sobre o comportamento de estruturas compósitas sujeitas a ações laterais. Na [11] testou o comportamento lateral de pórticos em GFRP, limitando a sua campanha experimental ao domínio elástico das estruturas, mostrando que o tipo de ligação e o tipo de travamento têm uma influência efetiva na rigidez dos pórticos.

Cavaleri *et al.* [12] estudaram o comportamento de uma estrutura porticada em GFRP, para uso num sistema modular de casas de emergência, tendo aplicado carregamentos horizontais e verticais. Os carregamentos horizontais, que pretendiam simular a ação equivalente (estática) do vento, incluíram uma reversão do sentido, não tendo sido realizados ensaios cíclicos. Os ensaios permitiram verificar que a estrutura cumpria e excedia os requisitos regulamentares para ações verticais e do vento.

Martins *et al.* [13] investigaram o comportamento de pórticos materializados por perfis putrudidos em GFRP de secção tubular sujeitos a ações laterais. Este estudo incluiu ensaios monotónicos e cíclicos em pórticos com e sem paredes em painéis sanduíche compósitos. Os resultados permitiram aferir a influência das paredes estruturais, que levaram a um aumento significativo da resistência e da rigidez dos pórticos, diminuindo, por outro lado, a sua ductilidade. Os ensaios cíclicos permitiram verificar que ambos os pórticos, com e sem paredes, apresentam um efeito de "pinching" bastante pronunciado, limitando a sua capacidade de dissipação de energia. Os autores foram ainda capazes de reproduzir o comportamento experimental dos pórticos sem paredes através de modelos de elementos finitos, utilizando o "Pivot Hysteresis model" para definir o comportamento das ligações [15].

Neste artigo, apresenta-se uma campanha experimental que visa enriquecer o conhecimento sobre o comportamento de pórticos em GFRP sob ações laterais. Para isso, foram ensaiados, sob ações monotónicas e cíclicas, pórticos à escala-real materializados por perfis pultrudidos em GFRP de secção em "I". Estes pórticos foram testados com diferentes tipos de ligação viga-coluna – desenvolvidas com um comportamento dúctil melhorado e capacidade de dissipação de energia [14-18] – com e sem paredes (divisórias leves), e com e sem um sistema de travamento materializado por cabos em aço inoxidável. Foi também desenvolvido um estudo numérico, validado pelos resultados experimentais, através do qual foi possível avaliar os efeitos da introdução de um dissipador no pórtico, em particular no que diz respeito à capacidade de dissipação de energia.

2 Estudo experimental

2.1 Descrição dos ensaios

A campanha experimental do presente estudo concentrou-se na avaliação do comportamento, monotónico e cíclico, de pórticos planos materializados por perfis pultrudidos em GFRP. Os perfis utilizados, produzidos pela *ALTO*, *Perfis Pultrudidos*, Lda, apresentam secção em "1" (150 × 75 × 8 mm) e são compostos por fibras de vidro tipo E e matriz com resina de poliéster, cujas propriedades mecânicas se encontram resumidas no Quadro 1.

Os pórticos de ensaio, ilustrados na Figura 1, eram compostos por duas colunas com 3000 mm de altura e duas vigas com 2500 mm de comprimento. As ligações viga-coluna, selecionadas através dos resultados de estudo anteriores, foram materializadas por peças de aço inoxidável (AISI 304 para as chapas e A2-70 para parafusos,



instrumentação

Quadro 1 Principais propriedades mecânicas dos perfis em GFRP utilizados [16]

Tipo de ensaio	Norma	Propriedade	Placa	Média \pm Desv. Pad.	Unidade
Tração	EN ISO 527 [19]	$\sigma_{\underline{u}\underline{\iota}}$	Alma	388,0 ± 25,0	[MDa]
			Banzo	353,4 ± 32,7	[I*IPa]
		E _{t,L}	Alma	43,4 ± 1,0	[GPa]
			Banzo	39,6 ± 1,2	
		U _{LT}	Alma	0,23 ± 0,02	[-]
			Banzo	0,29 ± 0,02	
Compressão	ASTM-D6641 [20]	σ _{cu,L}	Alma	461,9 ± 31,0	[MPa]
			Banzo	353,5 ± 32.7	
		E _{c,L}	Alma	44,9 ± 1,7	[GPa]
			Banzo	39,6 ± 1,2	
		$\sigma_{_{cu,T}}$	Alma	64,2 ± 2,12	[MPa]
		E _{c,T}		8,1 ± 0,6	[GPa]
	ASTM-D695 [21]	$\sigma_{_{cu,T}}$	Banzo	41,0 ± 3,6	[MPa]
		E _{c,T}		2,8 ± 0,2	[GPa]
Corte interlaminar	ASTM-D2344 [22]	$T_{is,L}$	Alma	27,0 ± 1,3	[MPa]
			Banzo	31,2 ± 1,0	
Corte no plano	ASTM-D5379 [23]	T _{LT}	Alma	46,8 ± 3,1	[MPa]
			Banzo	47,9 ± 2,6	
		G _{LT}	Alma	3,0 ± 0,3	[GPa]
			Banzo	3,7 ± 0,3	

cabos, porcas, etc.). Em particular, (i) na série F-R, as ligações eram compostas por duas cantoneiras de 6 mm de espessura, 8 parafusos por cantoneira e reforço da coluna (ligação BC-6-F2-R em [16]); enquanto que (ii) na série F-IC, se utilizou uma ligação do tipo "capacete" (ligação BC-IC-360 × 1,0 em [18]). Utilizando as ligações por cantoneiras, estudou-se ainda o efeito da introdução de (a) um sistema de contraventamento, materializado por cabos em aço inoxidável com 6 mm de diâmetro (tipo 7 × 9, série BF-R) e de (b) paredes divisórias leves, compostas por placas de gesso instaladas em suportes interiores de alumínio (série WF-R) – na Figura 2, ilustram-se vários detalhes destes pórticos. Importa ainda referir que

em todos os pórticos com ligações por cantoneira, se introduziu um reforço da alma das colunas na zona da ligação, através de chapas quinadas em aço inoxidável com 4 mm de espessura, de modo a evitar modos de rotura prematuros por esmagamento da alma ("punching").

Os pórticos (um provete por série) foram ensaiados numa parede de reação ou num pórtico metálico equivalente. Os ensaios decorreram através da aplicação de um deslocamento horizontal na viga superior dos pórticos, através de atuadores hidráulicos (em controlo de deslocamento). A força aplicada foi medida através de uma célula de carga, da marca *TML* e com capacidade de 300 kN.



Figura 2 Pórticos de ensaio: a) com contraventamento (BF-R); b) pormenor da ligação dos cabos de contraventamento; c) estrutura em alumínio para fixação das placas de gesso; e d) pórtico com paredes divisórias (WF-R)

Os deslocamentos da viga superior ("drift") foram medidos através de um defletómetro de fio da marca *Celesco* com 400 mm de curso, ou através do transdutor de deslocamentos do próprio atuador. No caso dos pórticos sem parede nem contraventamento (séries F-R e F-IC), foram também medidas as extensões em vários pontos das vigas e colunas, identificados na Figura 1.

Os ensaios monotónicos foram efetuados aplicando uma taxa de deslocamento de 0,5 mm/min, enquanto nos ensaios cíclicos a velocidade de carregamento foi aumentada para 1 mm/min. Para os ensaios cíclicos, definiu-se um histórico de deslocamentos com base nas recomendações do ECCS [24]. Utilizaram-se as recomendações deste protocolo para definir o deslocamento correspondente ao fim da proporcionalidade ($\delta_{_{EP}}$, equivalente a um deslocamento de cedência em estruturas de aço), o rácio de rigidez (ξ , que mede a perda de rigidez em cada ciclo, por comparação com a rigidez monotónica), o rácio de resistência (ε , que relaciona a força máxima em cada ciclo com a força correspondente à perda de proporcionalidade), e o rácio de dissipação de energia, que pode ser estimado através da expressão:

$$\eta_i = \frac{W_i}{\Delta F_{EP} \left(\Delta \delta_i - \Delta \delta_{EP} \right)} \tag{1}$$

onde W_i representa a energia dissipada no ciclo *i* (área delimitada pela curva histerética) e $\Delta F_{_{EP}}$, $\Delta \delta_{_{EP}}$ e $\Delta \delta_i$ são as amplitudes de (i) força e (ii) deslocamento no limite da proporcionalidade e de (iii) deslocamento no ciclo *i*.

2.2 Resultados dos ensaios

Na Figura 3, apresentam-se as curvas força vs. deslocamento obtidas nos ensaios monotónicos de todas as séries, enquanto no Quadro 2 se resumem os principais resultados, nomeadamente a rigidez inicial (K), o deslocamento e força correspondentes ao limite de proporcionalidade ($\delta_{_{FP}} e F_{_{FP}}$), e a força máxima ($F_{_{U}}$).



Figura 3 Curvas força vs. deslocamento obtidas nos ensaios monotónicos

Ambos os pórticos sem contraventamento nem parede (séries F-R e F-IC) apresentaram um comportamento inicial aproximadamente bi-linear, atingindo o limite de proporcionalidade para deformações relativamente reduzidas, 17 mm e 12 mm para as séries F-R e F-IC, com perdas de rigidez de 30% e 54% respectivamente. O primeiro dano visível nos pórticos ocorreu para deslocamentos semelhantes (~200 mm), para forças de 18,4 kN para a série

F-R e 15,3 kN para a série F-IC. No primeiro caso, o dano deveu--se à rotura por corte da ligação aparafusada na base de uma das colunas, enquanto no segundo caso se verificou rotura da alma de uma das colunas por "punching" (Figura 4a). No cômputo geral, as ligações através de cantoneiras mostraram-se capazes de providenciar ao pórtico um melhor comportamento mecânico, por comparação às ligações através de capacetes; por isso, as cantoneiras foram selecionadas para os estudos sobre a influência de contraventamentos e paredes divisórias.

Quadro 2 Principais resultados dos ensaios monotónicos

Série	<i>K</i> [kN/m]	δ _{ερ} [mm]	F _{EP} [kN]	F _u [kN]
F-R	158,5	16,9	2,9	22,4
F-IC	128,7	11,9	1,8	15,6
BF-R	365,5	10,9	3,8	33,4
WF-R	3060,6	2,6	7,4	29,1

Relativamente à série BF-R, como esperado, a introdução dos contraventamentos aumentou significativamente a rigidez inicial, embora o pórtico tenha apresentado um comportamento bi-linear semelhante ao da série F-R. O pórtico apresentou duas reduções de força significativas: a primeira (~20 kN) deveu-se à rotura transversal da alma de uma das colunas, por esmagamento da alma (web crippling), imediatamente após o reforço (Figura 4b). Após esta redução, o provete recuperou a força perdida com rigidez semelhante até ~25 kN. A partir deste ponto, registou-se uma diminuição progressiva da rigidez até à segunda redução abrupta de força (~33 kN), que ocorreu devido à rotura do cabo de aço inoxidável que constituía o contraventamento tracionado (Figura 4c). O pórtico manteve uma capacidade de carga considerável (~25 kN), apresentando um comportamento qualitativamente semelhante ao da série F-R.

Por fim, a série WF-R, com paredes divisórias, apresentou a rigidez inicial mais elevada (~10x), atingindo, no entanto, o limite de proporcionalidade para um deslocamento relativamente reduzido (~3 mm) e, a partir desse ponto, um comportamento marcadamente não linear, perdendo rigidez à medida que o dano na parede divisória se desenvolvia (Figura 4d). Este comportamento continuou até se atingir um pico de força (~26 kN), associado à rotura por compressão transversal da alma da coluna. O pórtico manteve uma capacidade de carga considerável, com rigidez diminuta, tendo o teste sido terminado antes de se esgotar o curso do atuador, por questões de segurança (começou a ocorrer queda parcial de blocos de gesso).

2.3 Resultados dos ensaios cíclicos

A Figura 6 apresenta as curvas histeréticas obtidas para cada uma das séries de ensaios cíclicos, juntamente com a respetiva curva monotónica para efeitos de comparação. Em todos os casos, a curva monotónica apresenta-se como uma boa envolvente da respetiva curva cíclica, mostrando a similitude de ambos os comportamentos. Esta semelhança estendeu-se aos modos de rotura observados, em tudo semelhantes aos descritos anteriormente.

No que diz respeito ao comportamento cíclico, todos os pórticos

apresentaram um efeito de "pinching" bem marcado, com curvas quase vazias nos quadrantes II e IV, limitando a sua capacidade de dissipar energia.

A Figura 6 apresenta a evolução dos parâmetros de avaliação do comportamento histerético propostos pelo ECCS [24], nomeadamente o rácio de rigidez, o rácio de resistência e o rácio de dissipação de energia. Estes resultados mostram que, apesar de terem um melhor comportamento monotónico, os pórticos com contraventamento e paredes têm um pior comportamento



Figura 4 Modos de rotura: compressão transversal da alma da coluna a) F-R e b) F-IC; c) rotura do cabo de aço inoxidável (BF-R); e d) dano nas placas de gesso (WF-R)



Figura 5 Curvas força vs. deslocamento obtidas nos ensaios cíclicos das séries: a) F-R, b) F-IC, c) BF-R e d) WF-R



Figura 6 Parâmetros histeréticos do ECCS [24]: a) rácio de rigidez; b) rácio de resistência; e c) rácio de dissipação de energia

cíclico. Em particular, a série WF-R apresenta uma perda de rigidez quase total a partir dos primeiros ciclos histeréticos, perdendo também a capacidade de aumentar a força absorvida relativamente cedo. Consequentemente, o seu rácio de dissipação de energia mantém-se em níveis bastante reduzidos (~0,3) desde o fim da perda de proporcionalidade. Já a série BF-R apresenta um melhor comportamento em termos de perda de rigidez e resistência, mas tem menor capacidade (relativa) de dissipação de energia que as séries F-R e F-IC. Isto deve-se essencialmente ao elevado nível de pinching provocado pelas deformações permanentes dos cabos de contraventamento. Por outro lado, a série F-IC, que apresentara o pior comportamento monotónico, apresenta o melhor comportamento histerético, em grande medida devido ao menor pinching, tendo maiores níveis de força nos quadrantes II e IV (Figura 5a) devido à reversão das deformações plásticas dos capacetes.

3 Estudo numérico

3.1 Simulação dos ensaios

De modo a simular e prever o comportamento lateral de pórticos de GFRP, foram desenvolvidos modelos de elementos finitos (EF), semelhantes aos utilizados na prática de engenharia, através do programa SAP 2000 [25], focados na série F-R, que apresentou o melhor comportamento mecânico nos ensaios experimentais. Após a validação dos modelos, através da comparação dos resultados numéricos com os experimentais (série F-R), analisou-se também o efeito da introdução de um sistema de dissipação de energia anteriormente desenvolvido para estruturas metálicas.

Todos os modelos desenvolvidos recorreram a elementos de barra,

com comportamento elástico-linear, e considerando a ortotropia do material GFRP (usando as propriedades apresentadas no Quadro 1). As ligações viga-coluna foram modeladas com elementos de ligação (*2-joint links*), com comportamento não linear definido através das curvas monotónicas obtidas experimentalmente [16] e do modelo de histerese de Pivot [14,26].

Deste modo, começou-se por desenvolver um modelo para simular os ensaios viga-coluna realizados anteriormente [16], o que permitiu a calibração dos parâmetros que definem o modelo de Pivot ($\alpha_1 = \alpha_2 = 100 \text{ e } \beta = \beta_2 = 0,7$), apresentando-se na Figura 7 a comparação entre o comportamento da ligação numérica e experimental.

Em seguida, desenvolveu-se o modelo dos pórticos da série F-R, ilustrado na Figura 8, seguindo os princípios enunciados anteriormente, tendo em consideração a calibração efetuada para as ligações viga-coluna, e respeitando as condições de fronteira observadas nos ensaios. Para além das ligações viga-coluna, a única outra fonte de não-linearidade do modelo são os apoios horizontais ao nível da viga inferior, que só atuam em compressão (tal como nos ensaios).

Nas Figuras 9a e 9b, apresenta-se a comparação entre os resultados numéricos e experimentais sob o efeito de ações monotónicas e cíclicas, respetivamente, observando-se uma boa concordância. A Figura 9b mostra que os ciclos histeréticos do modelo são ligeiramente mais fechados que os experimentais, especialmente nos últimos ciclos, o que se deve ao facto de os modelos não considerarem o dano no material GFRP e terem como única fonte de dissipação de energia o comportamento das ligações viga-coluna (e os apoios horizontais das colunas), traduzindo-se numa menor capacidade de dissipação de energia.



Figura 7 Comportamento da ligação viga coluna BC-6-F2-R, resultados numéricos e experimentais [16]: a) cíclicos e b) monotónicos



Figura 8 Modelo de elementos finitos dos pórticos

3.2 Estudo da introdução de um dissipador de energia

Por fim, após a validação do modelo, investigaram-se os eventuais benefícios de introduzir na estrutura um dissipador de energia. Para este estudo, escolheu-se um dissipador do tipo ADAS (Added Damping And Stiffness) [27,28], constituído por um conjunto de placas metálicas dimensionadas para atingir a cedência por corte em simultâneo. A potencial vantagem deste sistema na aplicação de estruturas em FRP é a facilidade de dimensionamento, sendo relativamente simples definir a rigidez e resistência desejadas,

permitindo a concentração de dano neste elemento enquanto os elementos FRP se mantêm em fase elástica. Neste caso, idealizouse um dissipador composto por 5 placas com 5 mm de espessura, altura livre de 300 mm e largura de 150 mm. A Figura 10 ilustra o modelo de EF desenvolvido, enquanto a Figura 11a mostra o comportamento monotónico e cíclico do dissipador idealizado.



Figura 10 Modelo de elementos finitos dos pórticos com um dissipador de energia





Figura 9 Curvas força vs. deslocamento, resultados numéricos e experimentais: a) monotónicos e b) cíclicos



Figura 11 Introdução de dissipador: a) comportamento do dissipador ADAS idealizado; b) curvas força vs. deslocamento; e c) energia dissipada

dos pórticos com e sem dissipador de energia, mostrando que a introdução deste sistema parece ser uma solução muito promissora para o aumento da capacidade de dissipação de energia de pórticos em GFRP.

4 Conclusões

Neste trabalho apresentou-se um estudo experimental sobre o comportamento de pórticos planos compostos por perfis pultrudidos em compósito de GFRP. Os resultados mostram que as ligações viga-coluna têm um efeito significativo no comportamento monotónico e cíclico dos pórticos. A introdução de paredes divisórias levou a um aumento da resistência e rigidez monotónicas, no entanto, o comportamento cíclico destes pórticos apresentou pior desempenho, mostrando que este tipo de elemento não deve ser tido em conta para efeitos de resistência sísmica.

Poroutro lado, o sistema de contraventamento testado, materializado por cabos de aço, também apresentou um comportamento cíclico deficiente, em grande parte motivado pelas elevadas deformações permanentes sofridas pelos cabos, não sendo um sistema adequado para melhoria do comportamento sísmico de pórticos em GFRP.

Foi ainda apresentado um estudo numérico, em que se mostrou que é possível prever o comportamento monotónico e cíclico destes pórticos através de modelos de elementos finitos (EF) relativamente simples. Os modelos de EF foram ainda utilizados para avaliar os efeitos da introdução de um dissipador de energia (ADAS) nestas estruturas, mostrando resultados promissores na melhoria do desempenho histerético dos pórticos. Esta solução deverá ser objeto de estudos futuros, nomeadamente de ensaios experimentais.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) pelo financiamento do CERIS (UIDB/04625/2020) e do IDMEC, através do LAETA, (UIDB/50022/2020), e do projeto FRP-Quake (PTDC/ECM-EST/6465/2014). O primeiro autor expressa também o seu agradecimento à FCT e ao IDMEC pelo financiamento através das bolsas SFRH/BD/141089/2018 e 10.CPM.2021, respetivamente.

Referências

- Keller, T. (2002) Fibre reinforced polymer materials in bridge construction. In IABSE Symposium, Towards a Better Built Environment – Innovation, Sustainability Information Technology, Melbourne.
- [2] Bank, LC. (2006) Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.
- [3] Bakis, C.E.; Bank, L.C.; Brown, V.; Cosenza, E.; Davalos, J.F.; Lesko, J.J.; Machida, A.; Rizkalla, H.; Triantafillou, T.C. (2002) – *Fiber-reinforced polymer composites for construction—State-of-the-art review*. Journal of Composites for Construction, 6(2), 73-87.
- [4] Correia, J.R. (2008) GFRP Pultruded Profiles in Civil Engineering: Hybrid Solutions, Bonded Connections and Fire Behaviour. PhD Thesis, Instituto Superior Técnico, Technical University of Lisbon, Lisbon.
- [5] Buragohain, M.K. (2017) Composite Structures: Design, Mechanics, Analysis, Manufacturing, and Testing. CRC Press, Boca Raton.
- [6] Coelho, A.M.G.; Mottram, J.T. (2015) A review of the behaviour and analysis of bolted connections and joints in pultruded fibre reinforced polymers. Materials & Design, 74, 86-107.
- [7] Correia, J.R.; Branco, F.; Gonilha, J.; Silva, N.; Camotim, D. (2010) Glass fibre reinforced polymer pultruded flexural members: assessment of existing design methods. Structural Engineering International, 20(4), 362-369.
- [8] Italian National Research Council (2007) CNR-DT 205/2007 Guide for the Design and Construction of Fiber-Reinforced Concrete Structures. Rome.
- [9] ASCE (2010) Pre-Standard for Load & Resistance Factor Design (LRFD) of Pultruded Fiber Reinforced Polymer (FRP) Structures. Canton.
- [10] Joint Research Centre (JCR) (2016) CEN/TC250/WG4 Prospect for New Guidance in the Design of Fibre Reinforced Polymer (FRP). Brussels.
- [11] Na, G.S. (2008) Load-Displacement Behavior of Frame Structures Composed of Fiber Reinforced Polymeric Composite Materials. PhD Thesis, Georgia Institute of Technology, Georgia.
- [12] Cavaleri, L.; Di Paola, M.; Ferrotto, M.F.; Valenza, A. (2019) Structural performances of pultruded GFRP emergency structures – Part 2: Fullscale experimental testing. Composite Structures, 214, 304-315.
- [13] Martins, D.; Sá, M.F.; Gonilha, J.A.; Correia, J.R.; Silvestre, N.; Ferreira, J.G. (2019) Experimental and numerical analysis of GFRP frame structures. Part 2: Monotonic and cyclic sway behaviour of plane frames. Composite Structures, 220, 194-208.

- [14] Martins, D.; Proenca, M.; Gonilha, J.A.; Sá, M.F.; Correia, J.R.; Silvestre, N. (2019) – *Experimental and numerical analysis of GFRP frame structures. Part 1: Cyclic behaviour at the connection level.* Composite Structures, 220, 304-317.
- [15] Martins, D.; Proença, M.; Correia, J.R.; Gonilha, J.; Arruda, M.; Silvestre, N. (2017) – Development of a novel beam-to-column connection system for pultruded GFRP tubular profiles. Composite Structures, 171, 263-276.
- [16] Martins, D.; Gonilha, J.; Correia, J.R.; Silvestre, N. (2021) Exterior beam-to-column bolted connections between GFRP I-shaped pultruded profiles using stainless steel cleats. Part 1: Experimental study. Thin--Walled Structures, 163, 107719.
- [17] Martins, D.; Gonilha, J.; Correia, J.R.; Silvestre, N. (2021) Exterior beam-to-column bolted connections between GFRP I-shaped pultruded profiles using stainless steel cleats, Part 2: Prediction of initial stiffness and strength. Thin-Walled Structures, 164, 107762.
- [18] Martins, D.; Gonilha, J.; Correia, J.R.; Silvestre, N. (2021) Monotonic and cyclic behaviour of a stainless steel cuff system for beam-to-column connections between pultruded I-section GFRP profiles. Engineering Structures, 249, 113294.
- [19] EN ISO 527-1 (1997) Determination of Tensile Properties Part 1: General Principles. Brussels.
- [20] ASTM D 6641/D 6641M-16e1 (2016) Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials Using a Combined Loading Compression (CLC) Test Fixture. West Conshohocken.
- [21] ASTM D 695-02 (2002) Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. West Conshohocken.
- [22] ASTM D 2344/D 2344M-00 (2000) Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composites Materials and their Laminates. West Conshohocken.
- [23] ASTM D 5379/D 5379M (2005) Standard Test Method for Shear Properties of Composites Materials by the V-Notched Beam Method. West Conshohocken.
- [24] European Convention for Constructional Steelwork (ECCS) (1996)
 Recommended Testing Procedures for Assessing the Behaviour of Structural Steel Elements under Cyclic Loads. Brussels.
- [25] Computer and Structures, Inc. (2016) SAP2000 V18 CSI Analysis Reference Manual. Berkeley.
- [26] Dowell, O.K.; Seible, F.; Wilson, E.L. (1998) Pivot hysteresis model for reinforced concrete members. ACI Structural Journal, 95, 607-617.
- [27] Whittaker, A.S.; Bertero, V.V.; Thompson, C. (1989) Earthquake simulator testing of steel plate added damping and stiffness elements (Vol. 89, No. 2). Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- [28] Xia, C. (1990) A Study of ADAS Element Parameters and their Influence on Earthquake Response of Building Structures. PhD Thesis, University of Michigan, Michigan.

Comportamento monotónico e cíclico de pórticos pultrudidos em compósito fibra-polímero David Martins, José Gonilha, João R. Correia, Nuno Silvestre, Luís Guerreiro