

COMPORTAMENTO ESTRUTURAL EM FLEXÃO DE PAINÉIS MULTICELULARES PULTRUDIDOS DE GFRP COM APLICAÇÃO EM TABULEIROS DE PONTES PEDONAIS

E. Tomás¹, M. F. Sá², J. R. Correia³, A. M. Gomes⁴, N. Silvestre³

¹ Aluno de Mestrado em Engenharia Civil, DECivil, IST/ICIST – UTL

² Aluno de Doutoramento em Engenharia Civil, DECivil, IST/ICIST – UTL

³ Professor Auxiliar, DECivil, IST/ICIST – UTL

⁴ Professor Associado, DECivil, IST/ICIST – UTL



RESUMO

Os materiais poliméricos reforçados com fibras de vidro têm evoluído de forma notória nos últimos anos, tendo sido desenvolvidos elementos de carácter uni e bidimensional com capacidade de se adaptarem às mais diversas situações na indústria da construção. Neste contexto, a produção de elementos de laje de secção multicelular, aliada às reconhecidas vantagens do material de GFRP, oferece uma nova alternativa aos materiais tradicionais na construção e reabilitação de pontes. Este artigo apresenta um estudo experimental sobre painéis pultrudidos, solicitados estática e dinamicamente à flexão, na sua direcção principal, para vários vãos de ensaio. Em complemento ao estudo experimental são apresentados resultados de modelos analíticos e numéricos aplicados às situações ensaiadas.

1 -INTRODUÇÃO

A leveza, os reduzidos tempos de montagem e custos de manutenção, a durabilidade e a resistência à corrosão, assim como as propriedades resistentes são das vantagens dos elementos de GFRP (*Glass Fibre Reinforced Polymer*) que os tornam uma possibilidade com elevado potencial para estruturas em geral, e pontes em particular. De acordo com Knippers (2007), o aumento dos custos de manutenção de tabuleiros de pontes tradicionais tem levado a que as entidades públicas se interessem por tecnologias alternativas, sendo que neste âmbito os painéis

pultrudidos se apresentam como uma nova e interessante opção.

Da vasta gama de painéis de FRP produzidos pelos principais fabricantes mundiais podem incluir-se os multicelulares pultrudidos de GFRP sobre os quais, apesar das vantagens salientadas, existem ainda algumas situações ou comportamentos menos favoráveis, também pouco estudados, que contribuem para uma limitação da sua aplicação na indústria da construção. São exemplos destes casos a excessiva deformabilidade, o comportamento dinâmico e ao fogo, a sua susceptibilidade a fenómenos de instabilidade e aos

efeitos diferidos por fluência (Sá 2007). Este artigo descreve o comportamento estático e dinâmico, em condições de serviço e à rotura, apresentando resultados de uma investigação experimental, analítica e numérica, de forma a contribuir para a descrição completa do comportamento mecânico e estrutural dos painéis pultrudidos de GFRP.

O estudo descrito nesta comunicação incidu sobre painéis multicelulares de GFRP, produzidos por pultrusão pela empresa sul-coreana *KOOKMIN COMPOSITE INFRASTRUCTURE*, sob a designação comercial *DELTA DECK™ SF.75L*, que têm como principal campo de aplicação a construção de tabuleiros de pontes pedonais (Lee, 2008). O seu princípio construtivo baseia-se na sua justaposição, transversalmente à direcção longitudinal da ponte (Fig. 1), interligando-se através de um sistema de conexão por encaixe vertical por pressão – *snap-fit*. Os painéis podem assentar sobre sistemas de longarinas em betão armado, aço ou GFRP, sendo a ligação assegurada mecanicamente, com ou sem recurso a colagem adesiva.

2 - CARACTERIZAÇÃO DO PAINEL

2.1 - Descrição geométrica do painel

O painel em análise é constituído por uma matriz de poliéster isoftálico, reforçada com fibra de vidro-E, na forma de “*rovings*” e mantas tecidas multi-direccionais (Lee, 2010). Com 2500 mm de comprimento na direcção da pultrusão, estes elementos de laje apresentam uma secção transversal celular composta por sete células de dimensões 90×75 mm, constituídas por laminados de GFRP com 4 mm de espessura, sendo que existe um incremento para 5 mm nas ligações banzo-alma e nas abas de extremidade correspondentes ao encaixe *snap-fit* (vd. Fig. 2).



Fig. 1 – Ligação sucessiva entre painéis multicelulares de GFRP (Lee, 2008).

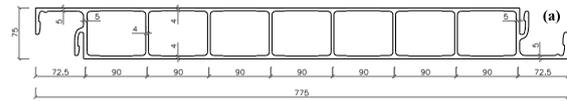


Fig. 2 – Secção transversal multicelular dos painéis pultrudidos de GFRP (Lee 2010).

Na Tabela 1 são apresentadas as principais propriedades geométricas da secção transversal do painel.

Tabela 1 – Propriedades geométricas da secção transversal do painel.

Área secção mm ²	Área corte mm ²	Momento inércia mm ⁴	Raio giração mm	Módulo flexão mm ³
9661	2550	9151×10 ³	31	244×10 ³

Por 702.5 mm de largura da secção modular.

2.2 - Caracterização mecânica do material

Previamente ao estudo experimental dos painéis multicelulares foi realizada uma campanha experimental com o objectivo de caracterizar mecanicamente o material de GFRP pultrudido que os constitui. Na Tabela 2 são resumidas as principais propriedades mecânicas do material dos painéis, bem como as normas de ensaio utilizadas nessa primeira campanha experimental.

Os ensaios de compressão, sobretudo na direcção longitudinal, foram inconclusivos devido à elevada dispersão de resultados ve-

Tabela 2 – Propriedades mecânicas do material laminado pultrudido de 4 mm.

Ensaio – Propriedade [norma]	Tensão Resistente [MPa]	Módulo de Elasticidade [GPa]
Corte interlaminar [EN ISO 14130]	36 ± 18%	-
Flexão [ISO 14125]	L 438 ± 13%	17 ± 09%
	T 155 ± 07%	13 ± 04%
Compressão [ASTM D 695-2]	L 218 ± 53% *	-
	T 98 ± 18%	-
Tração [ISO 527]	L 411 ± 08%	29 ± 07%
	T 34 ± 20%	10 ± 12%
Compressão de células	183 ± 01%	-
Teor em material inorgânico [ISO 1172]	67.9 % (alma) 64.4 % (banzo)	

* Resultado inconsistente. (L – longitudinal; T – transversal)

rificada, em consequência da reduzida dimensão dos provetes. Os pormenores destes ensaios, assim como os relativos aos ensaios ao nível das células, que pretendiam estudar a instabilidade local do elemento celular sob solicitação axial, podem ser consultados em Tomás (2011).

2.3 - Compressão transversal do painel

Foram efectuados ensaios de compressão transversal ao plano do painel, correspondente ao esmagamento das almas na direcção perpendicular à pultrusão. Estes ensaios tiveram por finalidade aferir a capacidade última do material das almas (por instabilidade ou resistência), sendo estas placas finas da secção mais susceptíveis às distribuições de tensões axiais na direcção “mais fraca” – transversal. De certa forma, os resultados àquela escala podem também ser comparados com os resultantes da caracterização em provetes sob compressão transversal. Além disso, o modo de solicitação em causa vai de encontro aos estados de tensão instalados no painel singular quando submetido em flexão (incluindo axiais combinados nas almas), quer na direcção principal quer secundária, permitindo, por exemplo, uma análise mais completa do comportamento dos painéis à rotura sob flexão.

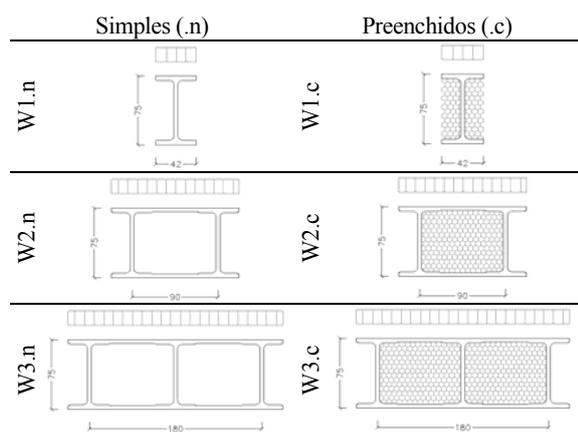


Fig. 3 – Secção dos módulos celulares ensaiados sob compressão transversal das almas.

A Figura 3 ilustra esquematicamente o conjunto das várias séries ensaiadas, que incluíram três provetes cada. As séries subdividiram-se em dois grupos de módulos celulares: (i) *simples* e (ii) *preenchidos*, com espuma leve rígida de poliuretano – PU (densidade 45 kg/m³).

Sobre as séries seleccionadas procurou-se reproduzir um carregamento axial uniformemente distribuído sobre módulos de painel com uma, duas e três almas, *i.e.*, secção em I, secção com uma célula e duas células, numa profundidade dos banzos de 140 mm (dobro da altura útil das almas). Os provetes foram instrumentados com deflectómetros eléctricos da marca *APEK*, com cursos de 25 e 50 mm, para registo dos deslocamentos horizontais e verticais, respectivamente. Em cada uma das 6 séries foi ainda instrumentado um provete com um extensómetro (resistência de 6 mm), da marca *TML*, a meia altura da alma na direcção vertical, *vd.* Fig. 4. O carregamento decorreu em controlo de deslocamentos para uma velocidade aproximada de 0.05 mm/s.

Na Figura 5 são apresentadas as curvas força – deslocamento vertical para os provetes *simples* e provetes *preenchidos*.



Fig. 4 – Ensaios de compressão transversal das almas: (a) 1 alma, (b) 2 almas com PU e (c) 3 almas.

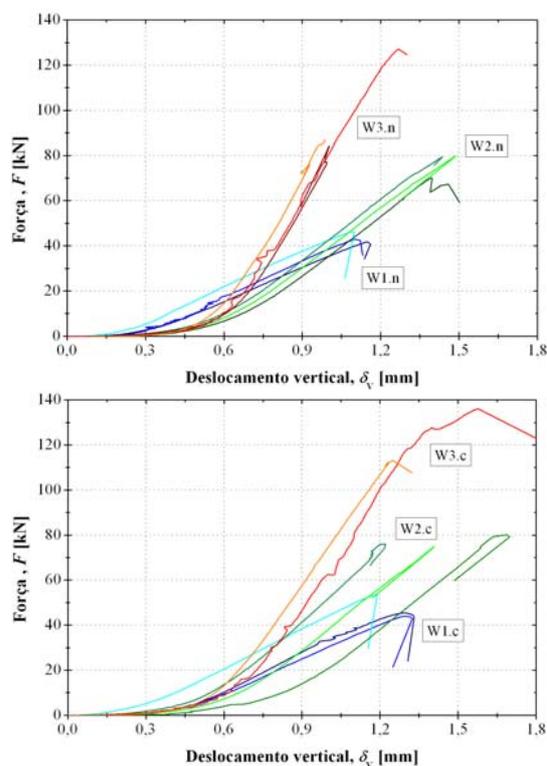


Fig. 5 – Diagramas força-deslocamento dos módulos: (i) *simples* (em cima) e (ii) *preenchidos* (em baixo).

Comparando ambos os diagramas pode verificar-se que a inclusão da espuma PU não interferiu de forma relevante quer nas tensões máximas avaliadas, quer no nível de rigidez das almas – diferenças máximas de 13%. Estas verificações podem ser suportadas pela análise dos valores que se mostram na Tabela 3: tensão máxima de compressão transversal nas almas ($\sigma_{cu,T}$) e da rigidez ($K_{c,T}$) em regime linear, obtidos daqueles diagramas. As tensões axiais foram estimadas com base numa distribuição uniforme no plano do painel, através da relação entre o carregamento total e a área de influência das almas afectas nesse plano. Os valores obtidos variam entre 61 a 85 MPa, os quais vão de encontro aos resultados obtidos nos ensaios de caracterização mecânica do material das almas à compressão transversal, nos quais se obtiveram valores médios na ordem de $76 \pm 18\%$ MPa, (Tomás, 2011). Faz-se notar uma ligeira tendência decrescente da tensão à medida que aumenta o número de almas dos módulos celulares. Esta situação, expectável, deve-se ao facto do cálculo simplificado das estimativas das tensões negligenciar a contribuição da rigidez dos banzos flectidos, associada à ligação banzo-alma, sendo mais significativo quanto mais placas verticais existirem ligadas aos laminados dos banzos.

Os reduzidos deslocamentos horizontais registados, sensivelmente, até aos níveis máximos da força revelaram que as roturas foram essencialmente por esmagamento do material, conduzindo ao corte último longitudinal das almas. Aliás, esta situação foi igualmente verificada nos módulos *simples*, sem preenchimento de espuma PU, que teria

por objectivo diferenciar modos de rotura por, de certa forma, contraventar a deformação / encurvadura das almas para fora do seu plano. Nesse sentido, para uma relação de 2 da placa *alma*, entre o seu comprimento (bordo solicitado) e a largura (bordo livre), o preenchimento ou não do núcleo tubular com espuma não se traduziu em comportamentos distintos do painel celular no seu plano quando sujeito a estados de compressão pura. Por fim, sublinhe-se que através da evolução das tensões estimadas, em função das extensões registadas, se obtiveram módulos de elasticidade à compressão na ordem de 8 GPa. Para a mesma direcção transversal, este valor foi relativamente próximo da constante material obtida em tracção (*vd.* Tabela2), pese embora em termos de resistência se verificar, como esperado, uma diferença de cerca de duas vezes mais (em compressão).

3 - ESTUDO EXPERIMENTAL

3.1 - Ensaio estáticos em flexão

Com a campanha experimental que se descreve neste ponto foi pretendido: (i) analisar o comportamento mecânico dos painéis pultrudidos submetidos à flexão por carregamento transversal na sua principal direcção, (ii) estimar as propriedades de rigidez longitudinal em flexão e (iii) avaliar a capacidade última daqueles elementos de laje e os seus modos de rotura. Em complemento a este estudo, foi ainda ensaiado um painel com o seu núcleo preenchido em espuma de poliuretano (PU), obtendo-se uma espécie de hibridização do painel – sanduíche. Deste modo, ficou assegurada uma análise comparativa entre os comportamentos de ambas as tipologias de painéis em flexão.

3.1.1 - *Ensaio de caracterização mecânica do comportamento em serviço*

Os ensaios de caracterização mecânica do comportamento em serviço à flexão longitudinal dos painéis multicelulares foram conduzidos sobre um modelo de laje simplesmente apoiada em dois bordos, sendo carregados a meio vão (flexão em 3 pontos, *3-PB*). O esquema de ensaio, representado na Figura 6, consistiu no apoio do painel sobre rótulas

Tabela 3 – Propriedades dos módulos dos painéis em compressão transversal.

Provetes de Ensaio		Rigidez [N/mm.10 ³]	Tensão última [MPa]
Simples	W1.n	52.6 ± 4%	77.9 ± 05%
	W2.n	88.5 ± 2%	68.3 ± 07%
	W3.n	193.6 ± 3%	61.1 ± 21%
Preenchidos	W1.c	59.7 ± 1%	85.1 ± 11%
	W2.c	94.8 ± 5%	68.8 ± 04%
	W3.c	169.6 ± 4%	74.2 ± 13%

cilíndricas (\varnothing 60 mm) colocadas entre duas chapas metálicas. O carregamento foi efectuado num pórtico metálico através de um perfil de distribuição de carga, cuja superfície de contacto foi uniformizada sobre a superfície pultrudida por meio de uma banda de neoprene. A carga foi aplicada por um macaco hidráulico da marca *Enerpac* associado a uma célula de carga *Novatech*, com uma capacidade máxima de 200 kN. A deformação vertical do painel foi medida através de três deflectómetros eléctricos, da marca *APEK* com curso de 50 mm, distribuídos ao longo da largura da secção de meio vão do painel.



Fig. 6 – Esquema dos ensaios em serviço (3-PB).

Os ensaios consistiram em carregamentos cíclicos de carga-descarga (repetição de três ciclos) em quatro painéis para três vãos diferentes: 1500 mm, 2000 mm e 2400 mm. A aplicação da carga decorreu até um limite de deformação correspondente à flecha $-L/200$. Esta primeira série totalizou um total de 12 ensaios, associados aos painéis FLn.1 a FLn.4, cujas designações de referência são: F – flexão, L – longitudinal, n/c – sem /com núcleo de espuma e # – número. Um quinto painel – FLc.5 foi igualmente ensaiado, onde o núcleo celular inicialmente vazio foi preenchido com espuma de PU, obtida da mistura de dois componentes fluidos (isocionato e polioliol) na proporção 1:1.

Na Figura 7 são apresentadas as curvas força-deslocamento a meio vão, para o conjunto dos cinco painéis ensaiados.

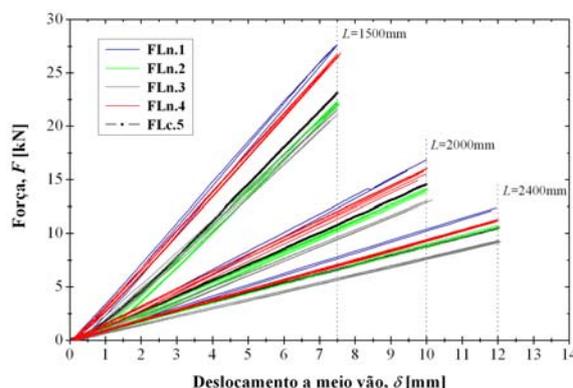


Fig. 7 – Diagrama força-deslocamento dos ensaios estáticos em serviço (3-PB), para diferentes vãos.

Em condição de serviço, os painéis com e sem preenchimento do núcleo apresentaram um comportamento elástico, praticamente linear nos três vãos de ensaio. Pode constatar-se alguma variabilidade da rigidez de flexão “aparente” dos painéis, sobre cada um dos diferentes vãos. Além da heterogeneidade do material, tais diferenças relativas podem estar associadas às imperfeições geométricas registadas sobre as paredes finas laminadas que formam a secção dos painéis (espessuras ± 3.5 a 4.5 mm). Como expectável, a rigidez do painel híbrido FLc.5 na direcção principal manteve-se bastante próxima dos níveis obtidos nos painéis “standard”. Além da rigidez de flexão “aparente” mencionada, foram também determinados os módulos de elasticidade e de distorção “efectivos” dos painéis (E_{ef} , G_{ef}), com base nos resultados experimentais dos vários painéis ensaiados para cada vão definido, *cf.* Tabela 4 – constantes elásticas. O procedimento que foi adoptado é sugerido na norma EN 13706 (2002), que define as exigências de normalização e especificação dos elementos pultrudidos de GFRP a usar na construção.

Tabela 4 – Propriedades de rigidez em flexão longitudinal “aparentes” e “efectivas” (média \pm cv).

Vão (L)	Esbelteza (L/i)	Módulo de elasticidade aparente (E_{ap})	Módulo de elasticidade efectivo (E_{ef})	Módulo de distorção efectivo (G_{ef})	Deformação por corte
[mm]	[-]	[GPa]	[GPa]	[GPa]	[%]
1500	48.7	26.4 \pm 10%			13.0
2000	65.0	27.7 \pm 11%	30.5 \pm 14%	4.0 \pm 30%	8.8
2400	78.0	28.7 \pm 12%			5.6

3.1.2 – Ensaio do comportamento à rotura

Na avaliação ao estado limite último, os painéis FLn.1 e FLn.4 foram solicitados até à rotura, para um único vão de 1500 mm, sendo as forças aplicadas a terços do vão (flexão 4-PB), tal como se mostra na Figura 8. Os painéis foram instrumentados ao longo da secção de meio vão com um deflectómetro eléctrico da marca *MG* (curso de 100 mm) e extensómetros *TML* (grelha de 6 mm). O ensaio dos dois painéis diferiu, apenas, no facto de se terem retirado ao painel FLn.4 as abas laterais de encaixe vertical, tornando a secção daquele elemento de laje numa forma multicelular perfeitamente simétrica.

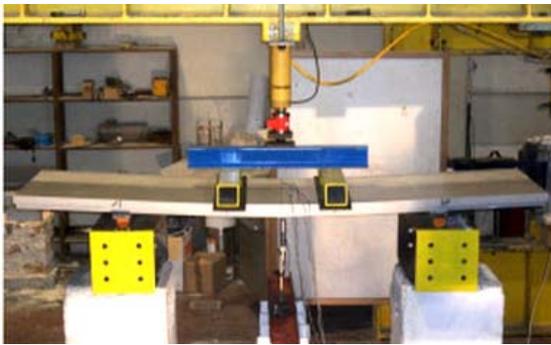


Fig. 8 – Esquema dos ensaios à rotura (4-PB).

O diagrama apresentado na Figura 9 representa a flecha dos painéis a meio vão em função da força aplicada. Em estado limite último, ambos os painéis (FLn.1 e FLn.4) apresentaram um comportamento semelhante, linear até à rotura, à excepção do troço final do painel FLn.4, como se pode observar no respectivo gráfico $F-\delta$. Não obstante, as roturas evidenciaram um comportamento frágil e de uma natureza bastante abrupta (Sá, 2012).

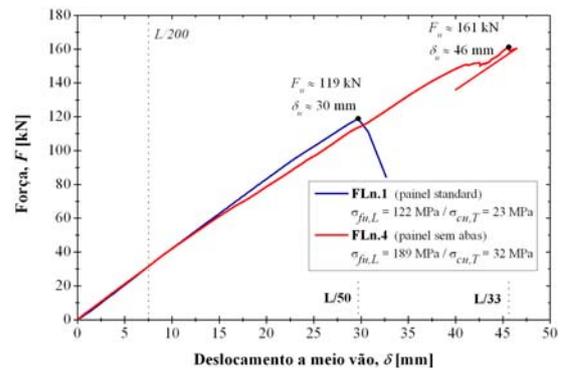


Fig. 9 – Curvas força-deslocamento dos ensaios estáticos à rotura (4-PB); para o vão de 1500 mm.

Considerando a capacidade última na rotura, o valor mais elevado foi registado no painel com secção simétrica – 35% superior à carga última registada no painel simples FLn.1 – correspondendo a um aumento da flecha de 53%. Para melhor interpretação dos resultados, na mesma Figura 9, além das cargas últimas obtidas experimentalmente (F_u), são também assinaladas as respectivas tensões longitudinais últimas em flexão nas faces extremas dos banzos ($\sigma_{fu,L}$), bem como as tensões últimas de compressão nas almas ($\sigma_{cu,T}$), sob as zonas de aplicação das cargas. Embora as primeiras tenham sido estimadas analiticamente, com base na teoria da elasticidade para modelo de viga, a ordem de valores obtida vai de encontro aos modos de rotura observados nos painéis, *vd.* Figura 10 para o painel FLn.1, à esquerda, e painel FLn.4, à direita. A rotura em ambos os painéis parece ter sido devida a uma interacção de efeitos, iniciada pela fissuração longitudinal nas zonas superiores das ligações banzo-alma, com evolução para corte rasante nessas uniões e pelo esmagamento localizado das almas, sob um dos pontos de aplicação de carga.

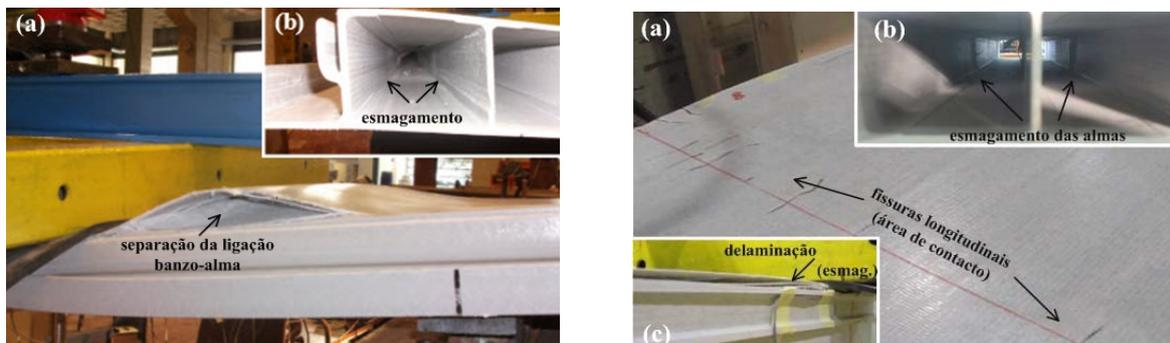


Fig. 10 – Roturas dos painéis: à esquerda – FLn.1 – (a) delaminação do banzo, (b) esmagamento das almas; e à direita – FLn.4 – (a) fissuração do banzo, (b) esmagamento das almas, (c) delaminação do banzo.

Seguiu-se o enrugamento progressivo das almas, conduzindo à delaminação do banzo e consequente separação final da ligação superior banzo-almas. Estes fenómenos foram mais pronunciados sobre o painel com secção celular simétrica, onde a rotura ocorreu precisamente de modo uniforme ao longo de toda a largura da secção (*i.e.*, esmagamento em todas as almas). Em relação à rotura do painel FLn.1, a definição assimétrica da sua secção conduziu a um esmagamento inicial sobre uma zona preferencial (cerca de metade da largura da secção), onde o banzo superior instabilizou localmente com separação da ligação superior banzo-alma sob a mesma área crítica de aplicação da carga.

3.2 - Ensaios dinâmicos em flexão

Os ensaios dinâmicos sobre os painéis, igualmente à escala real, permitiram avaliar a resposta dinâmica, tendo por base a determinação das suas frequências próprias de flexão e de torção. Além disso, foram estimados simplificadaamente os níveis de rigidez em flexão, para os vários vãos de ensaio. Importa referir que esta caracterização dinâmica experimental, à escala singular do painel, permitiu a calibração e validação dos modelos numéricos desenvolvidos e apresentados mais à frente neste artigo. O ensaio consistiu na indução de vibração dos painéis através de percussão particular – *excitação controlada* e no registo da aceleração vertical ao longo do tempo. Tal como nos ensaios estáticos, foram ensaiados dois tipos de painéis em função da configuração do seu núcleo: i) FDn.1 (simples) e ii) FDc.2 (híbrido); sob a designação: F – flexão, D – dinâmico, n/c – sem/com espuma PU e # – número). Faz-se notar a seguinte correspondência entre painéis: FLn.1 e FLc.5 serviram para os ensaios de FDn.1 e FDc.2, respectivamente. De igual modo, ambos os painéis foram sujeitos a excitações para os mesmos três vãos de ensaio, sob idêntica configuração de apoios nos bordos dos painéis. No entanto, inclui-se nesse sistema a colocação de grampos que garantiram uma ligeira fixação do painel às chapas metálicas de apoio, procurando-se deste modo evitar o ressalto do painel ou o

registo de vibrações indesejáveis durante a sua percussão. A vibração foi induzida de duas formas: (i) por percussão através de uma pancada com a mão; e (ii) por libertação do painel de uma posição deformada, através da suspensão de um peso de 20 kgf e sua posterior libertação instantânea, *vd.* Figura 11. A vibração foi provocada em dois pontos distintos: (i) no centro do painel (centrada) e (ii) junto a um dos acelerómetros (excêntrica). Faz-se notar que na libertação da posição deformada, a vibração foi causada ao longo de todo o alinhamento transversal da secção, no meio vão, recorrendo-se para tal efeito a um cabo que suspendia a carga, tal como se pode observar na Figura 11.



Fig. 11 – Esquema dos ensaios dinâmicos: (a) vista geral e (b) posicionamento dos acelerómetros.

O registo das vibrações verticais foi efectuado com uma frequência de 600 Hz (600 registos por segundo) com recurso a dois acelerómetros (marcas *Bruel & Kjaer* e *Endevco*) colocados no centro de cada célula de extremidade do painel, no alinhamento de meio vão. Estes foram associados a condicionadores de sinal da marca *Bruel & Kjaer*, sendo a precisão do conjunto de 0.01 m/s^2 . A aquisição dos valores dos aparelhos de medida foi realizada em PC através de uma unidade de aquisição de dados de 8 canais, da marca *HBM* e modelo *MX840*. Cada variante de ensaio, em termos de vão e tipo de excitação, foi repetida cinco vezes, perfazendo um total de 90 registos na globalidade da campanha experimental (45 por painel). Face à quantidade de registos recolhidos, na Figura 12 exemplifica-se a título de exemplo um registo em acelerações do painel FDn.1, sujeito a pancada centrada, para um vão de 1500 mm.

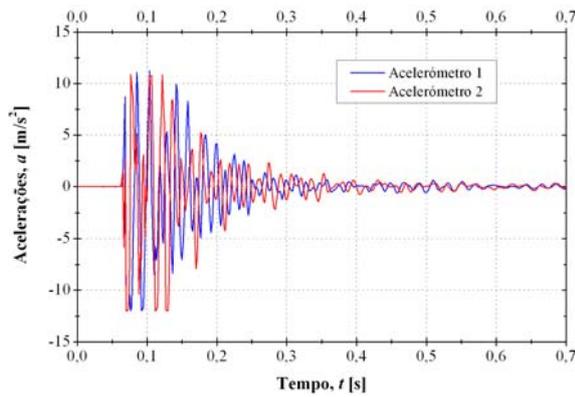


Fig. 12 – Registo de aceleração vertical no painel FDn.1 (1500 mm) para pancada centrada.

Os valores máximos registados para as vibrações mostraram que as acelerações no painel simples (FDn.1) foram, na sua generalidade, ligeiramente inferiores às do painel híbrido (FDc.2), pese embora não se ter garantido uma mesma intensidade de aplicação da carga nas diferentes variantes de ensaio. As frequências próprias de flexão e de torção foram obtidas mediante análise FFT (*Fast Fourier Transform*), através da média e diferença das acelerações registadas pelos dois acelerómetros, respectivamente. Como amostragem daquele tratamento de sinal, a Figura 13 apresenta as curvas resultantes $Sa-f$, em termos do valor espectral em função da frequência, para o painel FDn.1 na variante vão de 1500 mm e libertação de peso a meio vão.

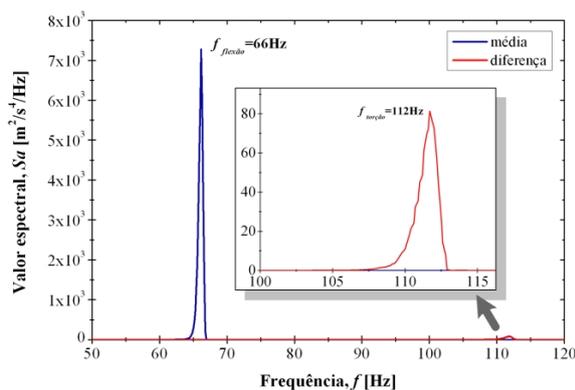


Fig. 13 – FFT do ensaio por pancada centrada para painel FDn.1 (1500 mm).

Na maior parte dos casos, foram claramente identificáveis os valores das frequências associados aos modos de vibração, quer por flexão quer por torção, salvo a excepção do

modo de torção no painel FDc.2 para o vão maior. Na Tabela 5 são resumidos os valores médios das frequências próprias (flexão e torção, f , Hz) para ambos os tipos de painel e vãos ensaiados. Além disso, encontram-se ainda listados os níveis de rigidez de flexão ($K_{f,din}$) obtidos com base na frequência de vibração simplificada de um oscilador de 1 grau de liberdade, os quais se comparam com as correspondentes parcelas obtidas dos ensaios estáticos (rigidez global média, $K_{f,est}$). A massa total concentrada considerada para os painéis foi ajustada em função do vão, mantendo-se coerente na sua ordem de vão.

Tabela 5 – Frequências médias de vibração (flexão e torção) e parcelas de rigidez.

Painel / Vão	$f_{torção}$	$f_{flexão}$	$K_{f,din}^*$	$K_{f,est}$	
				[mm]	[N/mm]
FDn.1	1500	$112 \pm 0\%$	$66 \pm 0\%$	3072	3434
	2000	$69 \pm 6\%$	$48 \pm 7\%$	1826	1521
	2400	$55 \pm 1\%$	$32 \pm 12\%$	866	912
FDc.2	1500	$97 \pm 1\%$	$62 \pm 0\%$	3074	3442
	2000	$83 \pm 7\%$	$43 \pm 1\%$	1673	1468
	2400	n/ registado	$31 \pm 5\%$	963	873

* 40, 45 e 49% de M para o respectivo vão de 1500, 2000, 2400 mm.

Analisando a globalidade dos resultados, pode constatar-se, como esperado, que as frequências diminuem em ordem inversa ao vão, para ambos os tipos de painel e modos de vibração identificados experimentalmente. Sobre os mesmos vãos, pode ainda verificar-se uma ligeira redução do valor da frequência de flexão no painel híbrido, face ao simples, sendo mais reduzida essa diferença no maior vão. Esta situação mostra que a influência da espuma no acréscimo de rigidez é inferior à sua influência no acréscimo de massa, no que se refere à resposta dinâmica do painel, embora se trate de uma espuma de densidade bastante reduzida. Sublinha-se que além da frequência será expectável que o amortecimento varie entre aquelas estruturas celulares distintas. Comparando os níveis de rigidez em flexão das duas tipologias, a análise precedente em regime estático sai corroborada, cujo efeito de hibridização do painel não se traduz em alterações significativas da rigi-

dez de flexão na direcção longitudinal da pultrusão dos painéis. Esta conclusão pode ser ainda suportada pela comparação entre a rigidez “dinâmica” e os níveis globais médios da rigidez “estática”. Avaliando esses resultados, verifica-se que, de facto, o aumento mássico percentual (15%) ente os dois tipos de painel é superior à diferença percentual (na ordem de 10%) entre níveis de rigidez, tornando-se clara a aproximação entre parcelas de rigidez determinadas. Assinala-se, porém, uma maior diferença para o vão 2000 mm, onde se pode associar também o facto de se terem obtido maiores desvios na identificação experimental da frequência. Não obstante, os resultados aqui apresentados validam os ensaios conduzidos sob diferentes regimes.

4 - ESTUDO ANALÍTICO E NUMÉRICO

4.1 - Modelação analítica

4.1.1 - Flexão estática

O limite da deformabilidade constitui um importante critério de dimensionamento dos painéis pultrudidos aos estados limites de serviço. Analiticamente, o comportamento em serviço, para flexão estática, pode ser modelado simplificadaamente com base numa teoria de elementos de viga – Teoria das Vigas de Timoshenko. A flecha em flexão é dada pela soma da parcela de deformação por flexão com a de deformação por corte. No caso de estudo em serviço – flexão 3.PB, o deslocamento máximo (δ) a meio vão do painel, submetido a carga concentrada (P) no vão (L), vem enunciado pela expressão (1),

$$\delta = \frac{1}{48} \cdot \frac{P \cdot L^3}{E \cdot I} + \frac{1}{4} \cdot \frac{P \cdot L}{K_s \cdot G \cdot A_v} \quad (1)$$

onde os módulos E_{ef} e G_{ef} correspondem aos referidos na Secção 3, I é o momento de inércia da secção em torno do seu eixo menor, A_v é a área de corte e k_s o factor de corte, assumido igual à unidade. Assumindo na expressão (1) as cargas aplicadas nos ensaios e as constantes elásticas determinadas, irá confrontar-se os deslocamentos assim obtidos com o limite de deformação correspondente, anteriormente considerado de $L/200$. Embora

se tratem de elementos de laje, o comportamento estrutural dos painéis GFRP em causa é essencialmente de carácter unidireccional, na direcção da pultrusão. Nesse sentido, será plausível estimar níveis de deformação com bastante razoabilidade para os painéis multicelulares, através de numa expressão teórica (1) que reflecte uma deformada elástica de um elemento de barra.

4.1.2 - Flexão dinâmica

A avaliação analítica das frequências naturais de flexão (f_n) do painel pode ser realizada de forma simplificada, assumindo-o num sistema em modelo de viga simplesmente apoiada, discreto ou contínuo, para vibrações transversais ao seu eixo. A expressão (2) representa a frequência própria do painel como um oscilador de um grau de liberdade, concentrando a massa distribuída do painel (M). A expressão (3) traduz essa mesma 1ª frequência estabelecida com base em equações diferenciais de equilíbrio, com a massa por unidade de comprimento (m) do painel, na sua secção uniforme, quer material quer geometricamente. A rigidez de flexão constante ($E \cdot I$) mantém igual significado aos referidos atrás, tal como o vão de ensaio (L).

$$f_1 = \frac{2}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot E \cdot I}{M \cdot L^3}} \quad (2)$$

$$f_1 = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I}{m \cdot L^4}} \quad (3)$$

Importa referir que no sistema discreto a massa concentrada (M) dos painéis foi ajustada de forma coerente tendo em conta o vão de ensaio em causa, tal como procedido anteriormente na obtenção da rigidez K_{din} .

4.2 - Modelação numérica

O desenvolvimento de modelos numéricos foi realizado no programa de cálculo automático SAP2000 (versão 14.2.4). Com este processamento procurou reproduzir-se tão fielmente quanto possível as condições de ensaio, de forma a garantir resultados comparáveis, por calibração e precisão razoável dos modelos. A modelação foi realizada com base em elementos finitos tridimensionais (vd. Figura 14), tendo sido o laminado de GFRP modelado através de elementos tipo

casca (thin shell). Na direcção longitudinal, os banzos do painel foram modelados com elementos de 20 mm (por vezes de 10 mm, para acertar pontualmente a superfície de carregamento). Na direcção transversal os elementos finitos dos banzos possuíam as dimensões 20, 25 e 35 mm, nas zonas de reforço da ligação banzo-alma, banzo (normal) e banzo na zona do encaixe, respectivamente. Em relação às almas, os elementos tiveram as mesmas dimensões na direcção longitudinal e 30.5 mm de altura.

No respeitante às condições de apoio, as chapas metálicas utilizadas nos ensaios (702.5×80×25 mm) foram simuladas também com elementos finitos de casca (com as propriedades do aço) numa malha igual à zona do banzo sobre elas colocado. A ligação entre estas chapas e o painel foi simulada através de *joint links*, que permitiam apenas a rotação de flexão, em todos os nós das malhas, *vd.* Figura 15. A carga foi aplicada sobre uma chapa metálica modelada de forma idêntica à do sistema de apoios, de modo a criar um elemento rígido de transmissão de carga ao painel, que evitasse assim a deformação excessiva do laminado dos banzos.

O laminado de GFRP foi modelado como um material ortotrópico, utilizando-se como valores das suas propriedades os obtidos experimentalmente nos ensaios de tracção (*vd.* Tabela 6), salvo aqueles para os quais não foram realizados ensaios, tendo sido esses valores baseados na bibliografia de referência (Keller 2006).

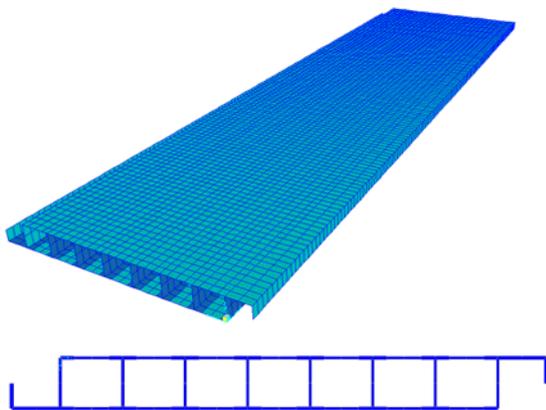


Fig. 14 – Modelo de elementos finitos: vista geral do painel (em cima) e secção transversal (em baixo).

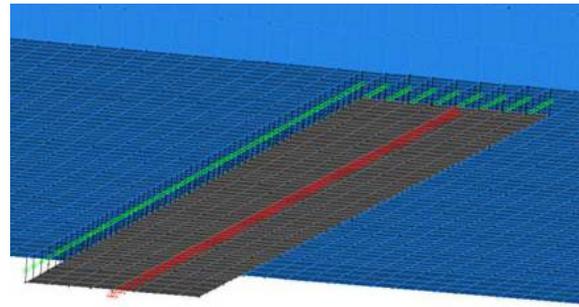


Fig. 15 – Modelação da chapa de apoio (*joint links*).

Tabela 6 – Propriedades do material de GFRP utilizadas no modelo numérico.

Módulo de elasticidade	E_x	28.7	[GPa]
	E_y	10.1	
	E_z^*	3.5	
Coeficiente de Poisson	ν_{xy}	0.30	[-]
	ν_{yz}	0.10	
	ν_{xz}^*	0.10	
Módulo de distorção	G_{xy}	4.0	[GPa]
	G_{yz}^*	4.0	
	G_{xz}^*	4.0	
Peso volúmico	γ	18.0	kN/m^3

* Valores extraídos da bibliografia.

Na modelação numérica, a obtenção da resposta dinâmica dos elementos de laje consistiu em efectuar apenas análises modais no programa de cálculo, aplicado para cada um dos modelos realizados.

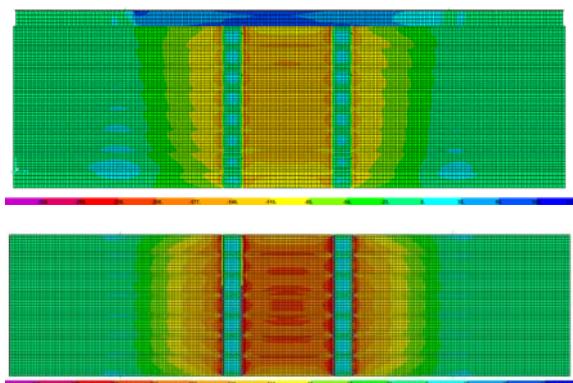
4.3 - Análise do comportamento estático (serviço e rotura)

Na Tabela 7 são resumidos os resultados referentes à análise do comportamento estático em estados limite de serviço e último, obtidos com base nos modelos analíticos e numéricos referidos. Esta apresentação de resultados baseia-se na comparação entre os valores da flecha obtidos experimentalmente e os obtidos por modelação aplicando a carga exercida nos ensaios experimentais.

Analisando os resultados é possível verificar que tanto os modelos analíticos como os numéricos traduzem de forma bastante satisfatória o comportamento em serviço dos painéis, uma vez que as diferenças de deslocamentos obtidos nas modelações são inferiores a 9% do respectivo resultado experimental. Na avaliação do comportamento na rotura são apresentadas na Figura 16 as tensões longitudinais de

Tabela 7 – Flechas a meio vão analíticas, numéricas e experimentais (e variação %).

Flecha [mm]	Vão	ELS			ELU
		1500	2000	2400	1500
$\delta_{Experimental}$	7.49	10.01	12.01	29.81	46.61
$\delta_{Analítica}$	7.10	9.70	11.98	31.80	-
	(-5.2%)	(-3.1%)	(-0.3%)	(6.7%)	-
$\delta_{Numérica}$	7.40	10.40	13.10	29.20	43.70
	(-1.2%)	(3.9%)	(9.1%)	(-2.0%)	(-6.2%)

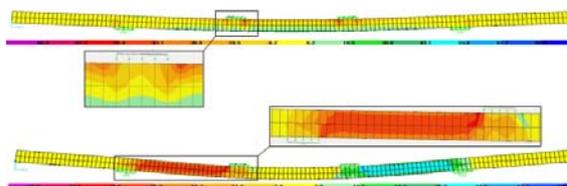
**Fig. 16** – Tensões longitudinais de compressão no banzo superior no painel: assimétrico com abas (em cima) e simétrico sem abas de ligação (em baixo) – escala de cores em MPa.

compressão dos painéis com secção assimétrica e simétrica para o nível de carga na rotura.

Da análise das tensões longitudinais é possível comprovar a existência de concentrações de tensões junto às zonas de carregamento, justificando-se a localização das roturas ocorridas na campanha experimental, em particular a verificada em zona preferencial no painel integral com abas de ligação nas suas extremidades. Por outro lado, os níveis de tensões instalados a meio vão obtidos dos modelos, cerca de 140 MPa (com abas) e 200 MPa (sem abas), são próximos das tensões longitudinais estimadas experimentalmente, com base em conceitos da teoria da elasticidade (122 MPa e 189 MPa, *vd.* gráfico da Figura 9), validando-se deste modo os modelos dos painéis quanto ao seu comportamento à rotura. Além disso, no mesmo programa de cálculo automático, foi também efectuada uma análise de estabilidade em termos de modos de encurvadura. Para ambos os painéis foram obtidos valores para as cargas críticas de instabilidade local nos banzos 33% superiores às respectivas cargas

últimas registadas experimentalmente.

Relativamente às tensões transversais obtidas nos modelos numéricos, mostra-se na Figura 17, a título de exemplo, as tensões instaladas no painel assimétrico, no que respeita as tensões de compressão e de corte, respectivamente, na alma mais solicitada.

**Fig. 17** – Tensões de compressão (em cima) e de corte (em baixo) no painel simétrico, numa das almas mais solicitada – escala de cores em MPa.

Neste caso de painel de secção assimétrica, verificou-se uma tensão de compressão máxima de aproximadamente 55 MPa, sendo porém um valor pontual devido à concentração de tensões. Em termos médios, aquela tensão sobre o apoio apresenta valores mais reduzidos, entre 25 a 35 MPa. Estes valores são ligeiramente superiores ao valor obtido simplifadamente a partir das cargas de ensaio (23 MPa, *vd.* Figura 9). Porém, o valor “experimental” mais reduzido pode ser explicado pela possibilidade de existência de excentricidade na aplicação da carga, levando a que a sua distribuição, ao longo da largura do painel, não fosse exactamente uniforme. Note-se que as tensões máximas determinadas no modelo são relativamente inferiores à resistência do material das almas (27%), sob compressão transversal – valor global médio de 76 MPa, *vd.* Secção 2. No entanto, esta constatação não pode excluir *a priori* os fenómenos que parecem ter conduzido ao modo de rotura observado sobre os painéis, nomeadamente o esmagamento localizado do material das almas, uma vez que as tensões e os valores resistentes não poderão ser directamente comparáveis. As tensões “numéricas” dizem respeito a estados de tensão instalados sob flexão 4.PB do painel simplesmente apoiado, tratando-se como tal de uma tensão de compressão combinada, ao contrário do estado axial puro à compressão em que se obteve a resistência do material (quer em provetes quer em módulos celula-

res).

Por fim, foi possível detectar no modelo uma tensão tangencial máxima aproximada de 40 MPa (*vd.* Figura 17), que se revela superior à determinada por via experimental, 30 MPa, assumindo tensões uniformes na área de corte. Uma vez mais, a possível excentricidade na aplicação do carregamento pode estar na origem daquela diferença dos valores da tensão, em virtude da não uniformidade da aplicação da carga na secção.

4.4 - Comportamento dinâmico

As estimativas das frequências obtidas nos dois primeiros modos – flexão e torção (*vd.* Fig. 18), através dos modelos analíticos e numéricos são apresentadas na Tabela 8.

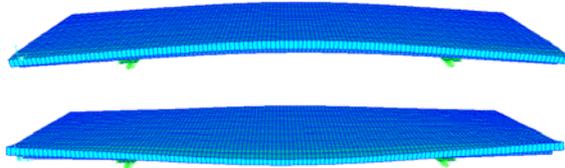


Fig. 18 – Configuração dos primeiros modos de vibração: flexão (em cima) e torção (em baixo).

Analisando os resultados pode verificar-se que ambas as expressões analíticas fornecem estimativas bastante razoáveis para a frequência de flexão. Em relação aos valores experimentais, as diferenças foram inferiores a 9%, à excepção do sistema contínuo, sobre o vão mais curto, para o qual a relação entre a rigidez e a massa distribuída do painel foi mais elevada, associando-se-lhe uma excessiva rigidificação. De facto, ao contrário do sistema em que se considerou o painel como um oscilador de massa única (onde esta se manteve ajustada de forma coerente em função do vão / consola), no sistema contínuo a influência das consolas não captada pela formulação sobrestimou a frequência naquele rácio mais reduzido vão / comprimento total do painel. Em todo o caso, para ambas as formulações analíticas, com o aumento do vão é-se conduzido a estimativas da frequência de flexão mais próximas da “real” (inferiores), por maior aproximação do sistema assumido (não descurando, como já salientado, o registo experimental mais dispersivo no vão de 2000 mm). Além disso, as variações registadas para as duas expressões

podem também estar asso-ciadas ao amortecimento, que foi desprezado.

Os modelos numéricos apresentaram, de um modo geral, resultados bastante precisos, próximos dos valores registados nos ensaios, à excepção da frequência de torção para o vão de 2000 mm, que apresenta um erro de 16%, ainda assim aceitável. Aliás, é sobre este vão que, uma vez mais, também os resultados numéricos confirmam a maior divergência perante os registos de ensaio.

Tabela 8 – Frequências de flexão e torção obtidas das modelações e suas variações (%) face aos resultados experimentais.

	Frequência [Hz]	Vão [mm]		
		1500	2000	2400
Flexão	Experimental	66.3	48.2	31.8
	Analítica (sist. discreto)	70.1 (5.7%)	44.0 (-8.7%)	30.7 (-3.6%)
	Analítica (sist. contínuo)	81.6 (23.1%)	47.0 (-2.5%)	30.6 (-3.9%)
	Numérica	68.2 (2.9%)	45.7 (-5.2%)	32.7 (2.8%)
	Experimental	111.9	68.9	54.7
Torção	Numérica	115.0 (2.8%)	80.2 (16.4%)	59.9 (9.5%)

Devido à dificuldade de modelar a espuma PU (dentro do núcleo tubular do painel), para um painel híbrido, não foi possível obter numericamente as frequências, bem como com-pará-las com as experimentais. No entanto, os modelos processados para o painel simples revelaram ser uma ferramenta acessível para estimar com precisão muito razoável as frequências de vibração, quer de flexão quer de torção, deste tipo de painéis celulares.

5 - CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentado um estudo sobre o comportamento estático e dinâmico de painéis multicelulares pultrudidos de GFRP, submetidos à flexão na direcção principal da pultrusão. Estes sistemas de natureza bidimensional têm sido cada vez mais valorizados no sector da construção, em particular na construção e/ou reabilitação de tabuleiros de pontes pedonais. Os motivos são justificados não só pelas reconhecidas vantagens do material pul-

trudido constituinte, mas também pelo desempenho da tecnologia das ligações ao nível do painel, nomeadamente a tipologia inerente ao painel em estudo – com ligações por encaixe vertical por pressão (*snap-fit*) nas suas extremidades. Foi realizada uma vasta campanha experimental, tendo os resultados obtidos sido comparados com os provenientes da aplicação de formulações analíticas e numéricas. Ao nível do comportamento estático, para níveis de carga, os ensaios permitiram verificar um comportamento elástico linear e avaliar propriedades de rigidez consonantes com valores tipicamente associados aos elementos de GFRP. Estes níveis de rigidez foram confirmados através dos resultados dos ensaios dinâmicos. Mostrou-se que os deslocamentos dos painéis submetidos a cargas transversais podem ser estimados com base em equações de vigas que incluam a deformabilidade por corte. Esta assunção simplificativa tem somente significado nestes elementos de laje devido ao seu carácter comportamental sobretudo unidireccional. O estudo permitiu concluir também que a introdução de um núcleo leve de espuma de poliuretano não influencia com relevância o comportamento estrutural dos painéis. Na caracterização à rotura, os dois painéis ensaiados revelaram valores máximos das cargas últimas bastante apreciáveis, evidenciando-se desde logo o potencial campo de aplicação destes painéis. Os modos de rotura ocorridos nos painéis multicelulares são essencialmente condicionados pela resistência do material das almas e das zonas de ligação banzo-alma, e pela interacção resistência / instabilidade sob compressão dos laminados dos banzos. Por fim, a modelação numérica realizada, sob várias vertentes, demonstrou ser possível simular de forma simples e com bastante precisão o comportamento mecânico das lajes de GFRP, no que se refere às suas respostas à rotura e em condições de serviço (deformação e vibração).

6 - REFERÊNCIAS

- Knippers, J., Gabbler, M. (2007), “New design concepts for advanced composite bridges: The Friedberg Bridge in Germany”; IABSE Reports, Vol. 92, 332-33.
- Sá, M.F. (2007), “Comportamento Mecânico e Estrutural de FRP. Elementos Pultrudidos GFRP”; Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas, IST, UTL, Lisboa.
- Lee, S.W., Hong, K.J., Kim, J.I. (2008), “Use of the promising composite “Delta Deck” for various composite-deck bridges”; CD-ROM Proceedings of the 4th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2008), Zurich., Switzerland.
- Lee, S.W. (2010), “Construction Specification: Delta Deck TM SF75L for footbridge deck installation”; Technical Document, Kookmin Composite Infrastructure, Inc. South Korea.
- EN ISO 14130 (1997), “Fibre-reinforced plastic composites: Determination of apparent laminar shear strength by short-beam method”.
- ISO 14125 (1998), “Fibre-reinforced plastic composites - Determination of flexural properties”.
- ASTM D 695-02 (2002), “Standard test method for compressive properties of rigid plastics”.
- ISO 527 (1997), “Determination of Tensile Properties - Part 1: general principles. Part 4: tests conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastics composites”.
- ISO 1172 (1996), “Textile-glass-reinforced plastics - Prepregs, moulding compounds and laminates - Determination of the textile-glass and mineral filler content –Calcination methods”.
- Tomás, E. (2011), “Comportamento em serviço de painéis multicelulares pultrudidos de GFRP com aplicação em tabuleiros de pontes pedonais”, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- EN 13706 (2002), “Reinforced plastics composites - Specifications for pultruded profiles - Part 2: Methods of test and general requirements”.
- Sá, M.F., Correia J.R., Silvestre N.P., Gomes A.M. (2012), “Experimental evaluation of the performance of pultruded deck panels for footbridge applications”, CD-ROM Proceedings of the 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2012), Rome, Italy.
- Keller, T. (2003), “Use of Fibre Reinforced Polymers in Bridge Construction”, Structural Engineering Documents, N.º.7, IABSE, Zurich, 131 p