

COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE PAINÉIS SANDUÍCHE COMPÓSITOS PARA APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO

Almeida, I.A.¹; Correia, J.R.¹; Branco, F.A.¹; Gonilha, J.A.¹

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



RESUMO

Neste artigo apresentam-se resultados de um estudo sobre as características mecânicas e o comportamento estrutural de painéis sanduíche para aplicações na indústria da construção. Os painéis estudados são constituídos por lâminas de reforço em polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP), tendo sido analisada a influência dos seguintes dois parâmetros: (i) características do material de núcleo, em que foram comparados uma espuma rígida de poliuretano (PU) e favos de mel em polipropileno (PP); (ii) bandas de reforço laterais em GFRP. O estudo experimental incluiu (i) ensaios de flexão, estáticos e dinâmicos, em lajes à escala real; (ii) ensaios de compressão no plano das lâminas; (iii) ensaios de compressão perpendicular ao plano das lâminas; e (iv) ensaios de tracção às lâminas. Relativamente ao estudo numérico, foram desenvolvidos modelos de elementos finitos tridimensionais dos painéis sanduíche ensaiados. Os resultados obtidos nos ensaios experimentais são comparados com os valores numéricos, permitindo a calibração e validação dos modelos desenvolvidos.

1- INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a necessidade de construções leves, com elevada resistência e durabilidade tem aumentado a procura de novos materiais e soluções estruturais, das quais os painéis sanduíche em materiais compósitos constituem um exemplo (Davies 2001). O princípio dos painéis sanduíche consiste na combinação de (i) duas lâminas finas exteriores, constituídas por um material rígido e resistente e (ii) um material de enchimento interior, de reduzida densidade e menor resistência e rigidez (Allen 1969). A construção sanduíche tem tido inúmeras aplicações nas indústrias naval, automóvel e aeroespacial. Na indústria da construção, referem-se as seguintes possíveis aplicações: tabuleiros de pontes pedonais, coberturas, pisos (em

particular, na reabilitação de edifícios antigos), painéis de fachada, elementos decorativos e mobiliário.

De entre as principais vantagens da construção sanduíche destacam-se as elevadas resistência e rigidez específicas, o reduzido peso próprio, o bom isolamento térmico, a durabilidade em ambientes agressivos, as múltiplas possibilidades de escolha de materiais e a facilidade de realizar formas complexas. Como principais dificuldades associadas a esta solução refere-se o fraco isolamento acústico (por comparação com soluções estruturais mais pesadas, como o betão e as alvenarias), a reduzida resistência a temperaturas elevadas, as deformações excessivas para determinadas solicitações, a grande variedade de modos de rotura e, sobretudo, a

falta de informação disponível para engenheiros e arquitectos, que dificulta o seu dimensionamento e, assim, a sua aceitação no sector da construção (Leite *et al.* 2004).

Com vista a melhorar o desempenho mecânico dos painéis sanduíche, têm vindo a ser estudados diferentes tipos de elementos de reforço. Um dos tipos de reforços mais estudados tem sido as costuras (*stitches*). Potluri *et al.* (2003) concluíram que, de acordo com o tipo de material compósito e de técnica de costura, assim podem variar as propriedades mecânicas, nomeadamente a resistência, a rigidez e o comportamento em fadiga das lâminas. Lascoup *et al.* (2006) estudaram também o efeito da introdução de costuras que atravessam o núcleo, ligando as duas lâminas, tendo concluído que aqueles elementos aumentam significativamente a rigidez e a resistência à flexão, bem como as resistências ao corte e à compressão do núcleo. Hassan *et al.* (2003) estudaram o efeito de elementos de fibras de arquitectura tridimensional, que estabelecem a ligação entre lâminas de GFRP e núcleos de espuma, tendo concluído que estes elementos aumentam o módulo de distorção do núcleo e a rigidez do painel sanduíche e que a espuma do material do núcleo contribui, antes da sua rotura, para o confinamento das fibras e para o aumento do módulo de distorção. Sharaf e Fam (2008) estudaram diferentes configurações de nervuras (*ribs*) e a sua influência nas propriedades mecânicas de painéis constituídos por lâminas de GFRP e núcleo em espuma de poliuretano. Os autores concluíram que as nervuras aumentam significativamente a resistência e a rigidez do painel.

Neste artigo apresentam-se resultados de um estudo analítico, experimental e numérico sobre as características mecânicas e o comportamento estrutural de painéis sanduíche desenvolvidos tendo em vista a sua possível utilização estrutural em aplicações da indústria da construção. Os painéis estudados são constituídos por lâminas de reforço em polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP), tendo sido analisada a influência dos seguintes dois parâmetros: (i) características do material de núcleo, em que foram comparados uma

espuma rígida de poliuretano (PU) e favos de mel em polipropileno (PP); (ii) bandas de reforço lateral em GFRP. O estudo experimental incluiu (i) ensaios de flexão, estáticos e dinâmicos, em lajes à escala real com 0.10 m de espessura, 2.50 m de comprimento e 0.50 m de largura; (ii) ensaios de compressão no plano das lâminas; (iii) ensaios de compressão perpendicular ao plano das lâminas; e (iv) ensaios de tracção às lâminas. Relativamente ao estudo numérico, foram desenvolvidos modelos de elementos finitos tridimensionais dos painéis sanduíche com núcleo em espuma rígida de PU, através do programa comercial SAP2000. Os resultados obtidos nos ensaios experimentais são comparados com os valores numéricos, permitindo a calibração e validação dos modelos desenvolvidos.

2- ESTUDO ANALÍTICO DO COMPORTAMENTO DOS PAINÉIS

Para se poder prever o comportamento dos painéis sanduíche em serviço e à rotura, foi feito um levantamento de equações analíticas que descrevem o seu comportamento mecânico. O comportamento de um painel ou de uma viga sanduíche pode ser comparado ao de uma viga com secção transversal em I, em que as lâminas funcionam como banzos, suportando os esforços de tracção e compressão, e o núcleo funciona como a alma do perfil, estabelecendo a distância entre as lâminas e suportando os esforços de corte. As lâminas encontram-se ligadas ao núcleo por meio de um material adesivo que transfere os esforços entre os dois elementos.

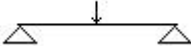


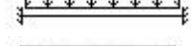
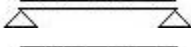
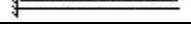
As deformações máximas dos painéis sanduíche constituem um critério de dimensionamento importante para os estados limites de serviço. A flecha em flexão de um painel sanduíche é a soma de duas parcelas: (i) a deformação por flexão e (ii) a deformação por corte. As expressões (1) e (2) permitem estimar a flecha máxima (w) a meio vão de um painel sanduíche sujeito a uma carga concentrada (P) ou uniformemente distribuída (p) ao longo do vão (L), respectivamente, onde b é a largura do painel, e_c é a espessura do núcleo, e_L

é a espessura das lâminas, D é a rigidez de flexão e G_c é o módulo de distorção do núcleo. Na Tabela 1 apresenta-se os valores das constantes K_g e K_s para diferentes condições de apoio e de carregamento. Certos materiais, como é o caso de algumas espumas e também das lâminas em GFRP, apresentam uma fluência considerável que, por isso, deve ser considerada nas verificações de segurança em serviço.

$$w = \frac{K_g PL^3}{D} + \frac{K_s PL}{b(e_c + e_L)G_c} \quad (1)$$

$$w = \frac{K_g pL^4}{D} + \frac{K_s pL^2}{b(e_c + e_L)G_c} \quad (2)$$

Tabela 1 – Valores de K_g e K_s para diferentes condições de apoio e de carregamento.

Condições de apoio e carregamento	K_g	K_s
	1/48	1/4
	1/192	1/4
	1/3	1
	5/384	1/8
	1/384	1/8
	1/8	1/2


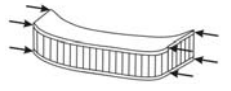

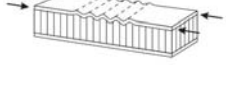


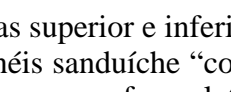
Num painel sanduíche existem diversos modos de rotura que podem limitar e condicionar a sua capacidade resistente, a qual depende não só dos materiais, mas também das dimensões do painel e da geometria da estrutura em si. A Tabela 2 ilustra os principais modos de rotura de painéis sanduíche, podendo as expressões que os descrevem ser consultadas em Almeida (2009).

3- ESTUDO EXPERIMENTAL

3.1 - Programa experimental

O objectivo da campanha experimental foi estudar e comparar o comportamento de quatro tipos de painéis sanduíche

Tabela 2 – Ilustração de diferentes modos de rotura em painéis sanduíche (adaptado de Hexcel Composites 2000).

Modo de rotura	Ilustração
Tracção em flexão das lâminas	
Instabilidade por encurvadura global	
Corte “frisado”	
Encurvadura entre células	
Enrugamento	
Corte do núcleo	
Esmagamento	

compósitos com lâminas superior e inferior em GFRP: (i) dois painéis sanduíche “convencionais”, sem reforços nas faces laterais, com núcleo em espuma rígida de poliuretano (PU) ou em favos de mel de polipropileno (PP) (com as designações PU-U e PP-U, respectivamente) e (ii) dois painéis sanduíche com reforços nas faces laterais também em GFRP e cada um deles com os referidos materiais de núcleo (com as designações PU-R e PP-R). Os painéis sanduíche foram produzidos pela empresa portuguesa ALTO, Perfis Pultrudidos, Lda, pela técnica de *hand lay-up* (Fig. 1). As lâminas de GFRP são constituídas por três tipos de mantas de fibras de vidro, aglomeradas com uma matriz polimérica de resina de poliéster: (i) véus de noiva, (ii) mantas com fibras aleatórias e (iii) mantas com fibras tecidas. Nos painéis PU-R e PP-R, os reforços laterais foram realizados através da dobragem das mantas de uma das lâminas (a superior), tendo os remates sido executados sobre as extremidades longitudinais da lâmina oposta.



Fig. 1 – Diferentes fases da produção dos painéis sanduíche pela técnica de *hand lay-up*.

Foram realizados diversos ensaios experimentais para caracterizar o comportamento mecânico dos painéis sanduíche. Inicialmente, procurou-se caracterizar os materiais constituintes dos painéis, tendo sido realizados ensaios de tracção das lâminas de GFRP e ensaios de compressão no plano perpendicular às lâminas e no plano das lâminas em provetes do material dos painéis (Fig. 2). Posteriormente, foram realizados ensaios de flexão estáticos e dinâmicos em painéis à escala real, para avaliar o seu comportamento estrutural, em particular permitindo determinar a respectiva rigidez, resistência e comportamento dinâmico.



Fig. 2 – Ensaio dos laminados à tracção (à esquerda); ensaio de compressão transversal (ao centro); ensaio de compressão no plano (à direita).

3.2 - Ensaios de tracção das lâminas

Os ensaios de tracção das lâminas foram realizados de acordo com a norma ISO 527-1,4 (1997) em 6 provetes de GFRP idênticos às lâminas dos painéis, com um comprimento de 300 mm, uma largura de 25 mm, uma espessura de 6 mm e uma distância entre garras de 150 mm. A força de tracção foi aplicada segundo o eixo longitudinal dos provetes, a uma velocidade de 0.18 mm/s, através de uma máquina universal de ensaios hidráulica, de marca Instron, com uma capacidade de carga de 250 kN, tendo sido aplicada uma pressão nas garras de 40 bar. O registo dos valores das cargas e dos deslocamentos foi realizado em PC por meio de uma unidade de aquisição de dados de 8 canais, de marca HBM, modelo Spider8. Em 3 dos pro-

vetes ensaiados foram utilizados extensómetros da marca TML com o objectivo de medir a extensão na sua direcção longitudinal.

O material apresentou um comportamento elástico linear até à rotura, que ocorreu de forma frágil. Estes ensaios permitiram determinar os valores da resistência à tracção ($\sigma_{tu,x}$), da extensão na rotura ($\varepsilon_{tu,x}$) e do módulo de elasticidade ($E_{t,x}$) em tracção na direcção longitudinal (Tabela 3). É de notar que, tendo em consideração a simetria das mantas de reforço utilizadas na produção dos painéis, as propriedades mecânicas das lâminas na direcção transversal serão idênticas às obtidas na direcção longitudinal.

Tabela 3 – Propriedades em tracção dos laminados de GFRP.

$F_{máx}$ [kN]	$\sigma_{tu,x}$ [MPa]	$\varepsilon_{tu,x}$ [1×10^{-6}]	$E_{t,x}$ [GPa]
32.60	202.39	1128	20.47
± 1.98	± 15.35	± 84	± 0.92

3.3 - Ensaio de compressão perpendicular ao plano das lâminas

No ensaio de compressão perpendicular ao plano das lâminas foi avaliado o comportamento em compressão de painéis constituídos pelos dois materiais de núcleo (PP e PU), uma propriedade que é relevante nomeadamente nas zonas dos apoios. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma ASTM C365 (2003) em provetes sanduíche de secção quadrada (em planta) com 100 mm de aresta, com lâminas e material de núcleo com espessuras nominais de 5 mm e 90 mm, respectivamente. Para assegurar uma transmissão uniforme das cargas entre a prensa e os provetes, foi aplicada uma camada de resina de poliéster sobre as lâminas de modo a garantir o seu nivelamento (que não era absolutamente homogéneo ou horizontal) e, deste modo, que essas superfícies estivessem em total contacto com o prato da prensa. A carga foi aplicada através da mesma máquina utilizada nos ensaios de tracção e o registo dos valores das cargas e dos deslocamentos foi realizado em PC por meio de uma unidade de aquisição de dados de 8 canais, de marca HBM e modelo Spider8.

Os diagramas força-deslocamento vertical obtidos (Fig. 3) mostram que ambos os materiais de núcleo apresentaram um comportamento inicial aproximadamente linear até se atingir a força máxima ($F_{cu,t}$), a qual foi de 24.1 kN, para os favos de mel em PP, e de 3.01 kN, para a espuma rígida de PU. Após um decréscimo da força (o qual se apresentou muito menos pronunciado nos favos de mel em PP), os diagramas força-deslocamento vertical de ambos os materiais apresentaram um patamar com aumento das deformações para valores de força aproximadamente constantes até se proceder à descarga dos provetes. Nesta fase, não foram evidentes quaisquer sinais de rotura nos painéis com espuma rígida de PU; já nos painéis com núcleo em PP, ocorreu esmagamento das células dos favos de mel (Fig. 2). As deformações residuais observadas em ambos os tipos de provetes foram elevadas.

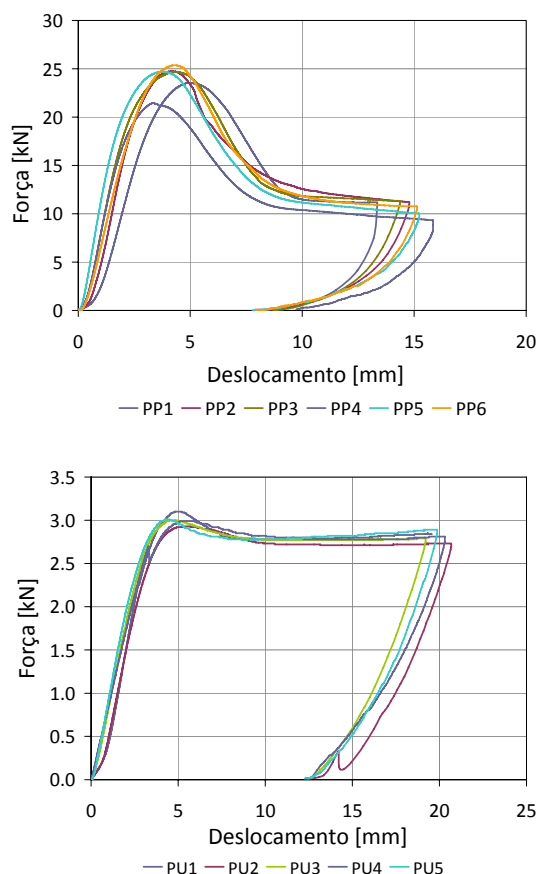


Fig. 3 – Diagramas força-deslocamento dos provetes com núcleo (i) de favos de mel de PP (em cima) e (ii) de espuma de PU (em baixo).

Com base naqueles diagramas, determinaram-se os valores da tensão máxima de compressão ($\sigma_{cu,t}$), da rigidez

($K_{c,t}$) e, com base na hipótese da indeformabilidade das lâminas de GFRP, foram estimados os módulos de elasticidade aparentes ($E_{c,t,ap}$) dos dois materiais (Tabela 4). Os favos de mel em PP apresentaram-se consideravelmente mais rígidos e resistentes do que a espuma rígida de PU.

Tabela 4 – Propriedades dois painéis em compressão transversal para os dois tipos de núcleo.

Propriedade	Núcleo	
	PP	PU
$F_{cu,t}$ [kN]	24.09 ± 1.41	3.1 ± 0.06
$\sigma_{cu,t}$ [MPa]	2.40 ± 0.16	0.29 ± 0.01
$K_{c,t}$ [kN/mm]	10.43 ± 1.54	1.02 ± 0.10
$E_{c,t,ap}$ [MPa]	52.90 ± 5.21	0.29 ± 0.01

3.4 - Ensaio de compressão na direcção do plano das lâminas

No ensaio de compressão na direcção do plano das lâminas foi avaliado o comportamento, na direcção transversal, dos painéis sanduíche constituídos por ambos os materiais de núcleo. Foram ensaiados provetes de planta quadrada com aproximadamente 250 mm de lado e espessura nominal de 100 mm de acordo com a norma ASTM C364 (1999). Também aqui as superfícies dos provetes em contacto com os pratos da prensa foram regularizadas. Nos provetes com núcleo em PP, tal foi conseguido através da adição de uma camada de resina de poliéster, dado que a superfície daquele núcleo é descontínua devido à geometria dos favos de mel. No ensaio de metade dos provetes foram colocados dois deflectómetros, um à esquerda e outro à direita do provete, para medir os deslocamentos horizontais no centro de cada provete. A carga foi aplicada através da mesma máquina utilizada nos ensaios de tracção.

Nos diagramas força-deslocamento axial dos dois tipos de provetes (Fig. 4), observou-se um comportamento inicial não linear devido aos ajustes do sistema de aplicação da carga, nomeadamente o ajuste das chapas metálicas ao provete. Seguiu-se um aumento de carga aproximadamente linear até um valor de cerca de 110 kN, observando-se, a partir daí, um pequeno troço com aumento dos deslocamentos para um valor de força aproximadamente constante. Após este troço, correspondente

ao início das deformações horizontais dos provetes, a carga voltou a aumentar como anteriormente até se atingir a rotura. Nos provetes com núcleo de PP a rotura deu-se por i) instabilização das lâminas por encurvadura, seguida nalguns casos de delaminação, com descolamento entre o núcleo e a lâmina do lado interior da curvatura do provete e ii) esmagamento de uma das lâminas junto ao prato da prensa hidráulica. Nos provetes com núcleo de PU a rotura ocorreu, na maioria dos casos, por instabilização das lâminas por encurvadura, seguida de delaminação. Houve casos em que se deu ainda a rotura por corte da espuma de PU (Fig. 2) e/ou esmagamento localizado das lâminas junto aos pratos da prensa hidráulica.

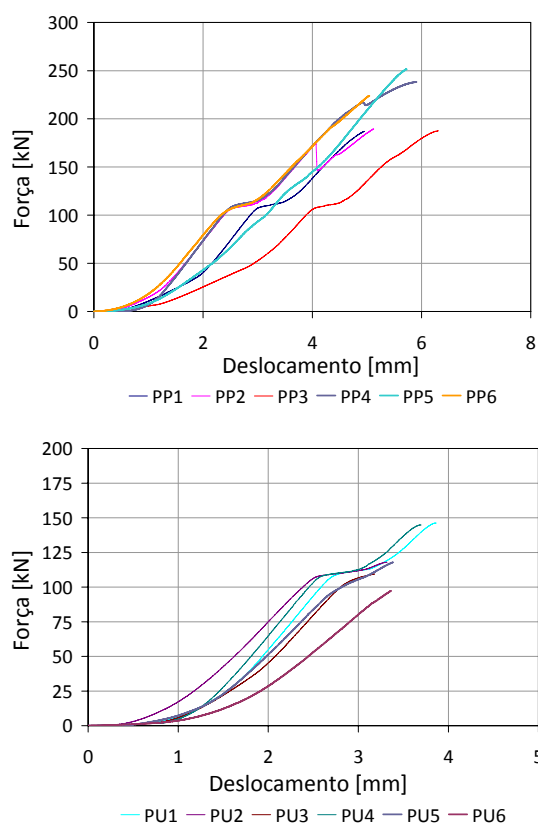


Fig. 4 – Diagramas força-deslocamento axial dos provetes com núcleo em favos de mel de PP (em cima) e espuma rígida de PU (em baixo).

Com base nos diagramas força-deslocamento axial, determinaram-se os valores da força de rotura ($F_{cu,L}$), da tensão máxima de compressão ($\sigma_{cu,L}$) e da rigidez axial ($K_{c,L}$) (Tabela 5). A força de rotura dos provetes com núcleo de PP (212.9 kN) foi aproximadamente o dobro da dos provetes com núcleo de PU (122.3 kN). A

espuma de PU revelou-se mais flexível no plano perpendicular às lâminas do que os favos de mel de PP, permitindo um melhor acompanhamento da deformação das lâminas. A rigidez axial dos dois tipos de painéis analisados é da mesma ordem de grandeza, já que depende essencialmente das lâminas, apresentando-se consideravelmente inferior à rigidez axial de pisos em betão e de madeira. Tal poderá constituir uma desvantagem relativa para a sua utilização em pisos de edifícios, podendo ser necessário adoptar lâminas mais espessas. Neste caso, para obter uma rigidez semelhante à de pisos de madeira correntes, seria necessário duplicar a espessura das lâminas (Almeida, 2009).

Tabela 5 – Propriedades dois painéis em compressão no plano das lâminas para os dois tipos de núcleo.

Propriedade	Núcleo	
	PP	PU
$F_{cu,L}$ [kN]	212.9 ± 28.7	122.3 ± 20.0
$\sigma_{cu,L}$ [MPa]	3.31 ± 0.43	2.01 ± 0.29
$K_{c,L}$ [kN/mm]	65.49 ± 10.76	67.95 ± 9.62

3.5 - Ensaios estáticos de flexão dos painéis sanduíche

Foram realizados dois tipos de ensaios em flexão estáticos, de acordo com a norma ASTM C393 (2000), para a caracterização do comportamento (i) em serviço e (ii) à rotura dos painéis. O primeiro tipo de ensaios consistiu no carregamento dos painéis em 3 pontos até se atingir um deslocamento a meio vão de 10 mm. O segundo tipo de ensaios consistiu no carregamento dos painéis em 4 pontos até à rotura (Fig. 5).

Os painéis, com um comprimento de 2.50 m, uma largura de 0.50 m e uma espessura nominal de 0.10 m (lâminas de 5 mm e material de núcleo de 90 mm), foram ensaiados num vão de 2.30 m, apoiados em rótulas cilíndricas colocadas entre chapas metálicas com uma superfície de contacto de $0.06 \times 0.5 \text{ m}^2$ com a face inferior dos painéis. Num dos apoios, o deslocamento horizontal também foi restringido. A carga foi aplicada a meio vão através de um macaco hidráulico da marca Enerpac, com uma capacidade de carga de 300 kN, tendo sido medida com uma célula

la de carga da marca Novatech, com uma capacidade de 300 kN. Para garantir uma distribuição uniforme das cargas ao longo da largura dos painéis, no primeiro tipo de ensaios (flexão em 3 pontos), recorreu-se a uma viga de distribuição metálica tubular, com secção de $0.04 \times 0.08 \text{ m}^2$ e comprimento idêntico à largura dos painéis, interposta entre o macaco hidráulico e o painel; no segundo tipo de ensaios (flexão em 4 pontos), as duas cargas foram aplicadas a uma distância de 0.38 m da secção de meio vão, tendo sido utilizadas duas vigas de distribuição metálicas tubulares, com largura de 0.10 m e comprimento idêntico à largura dos painéis, e uma viga longitudinal, também metálica, interposta entre as vigas anteriores e a célula de carga. Sob o painel foram colocados três deflectómetros eléctricos, com um curso de 100 mm - um dos deflectómetros foi colocado a meio vão e os outros dois nas secções de aplicação das cargas (flexão em 4 pontos). Nos ensaios à rotura foram ainda colocados 4 extensómetros na secção de meio vão do painel (dois na face superior e dois na face inferior), distando 7.5 cm do centro da largura do painel, de modo a medir-se o valor das extensões nesta secção.

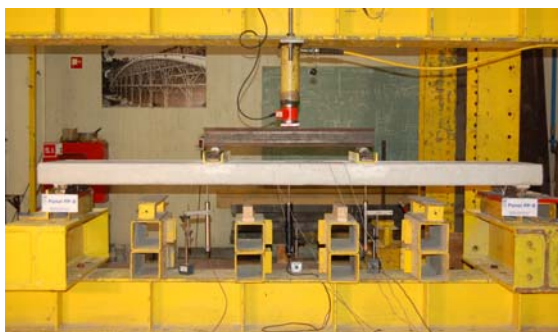


Fig. 5 - Esquema do ensaio de flexão em 4 pontos.

3.5.1 Ensaios de caracterização mecânica do comportamento em serviço

Para a caracterização mecânica dos painéis, foram realizados três ciclos de carga-descarga; em cada ciclo os painéis foram carregados até um deslocamento máximo de 10 mm. Nos dois últimos ciclos, o carregamento foi aplicado durante 10 minutos antes de se proceder à descarga do painel.

Para o nível de carregamento definido (deslocamentos até cerca de 10 mm),

todos os painéis apresentaram um comportamento elástico linear, com deslocamentos residuais após a descarga inferiores a 1 mm. Os parâmetros de rigidez de flexão e de corte e as constantes elásticas aparentes dos materiais dos painéis sanduíche foram determinadas através das expressões do deslocamento a meio vão para carregamentos de flexão em 3 pontos e em 4 pontos. Sendo conhecidos os valores do vão e das relações força-deslocamento para ambos os tipos de carregamento, é possível determinar os valores das rigidezes de flexão, D , e de corte, U , com base nas expressões apresentadas na norma ASTM C393 (2000). Os resultados obtidos através deste método, nomeadamente as estimativas do módulo de elasticidade aparente das lâminas, E_{GFRP} , e do módulo de distorção aparente do núcleo, G_c , nem sempre foram congruentes, especialmente no que respeita à rigidez de flexão (Almeida, 2009).

3.5.2 Ensaios à rotura

Nestes ensaios, os painéis foram monotonicamente carregados até à rotura. Apresenta-se na Fig. 6 os diagramas força-deslocamento vertical a meio vão dos quatro painéis ensaiados. Todos os painéis apresentaram um comportamento aproximadamente linear até à rotura, com uma ligeira perda de rigidez para valores da força aplicada relativamente próximos da carga de colapso.

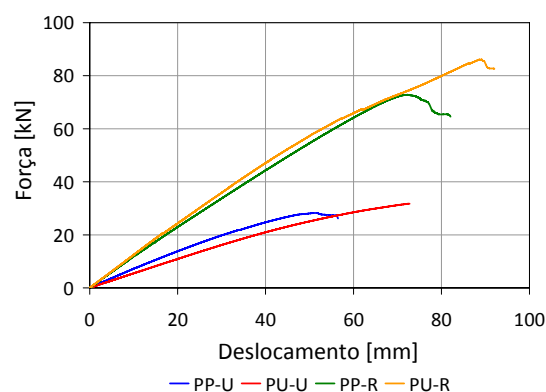


Fig. 6 - Diagramas força-deslocamento dos ensaios dos painéis até à rotura.

Na Fig. 7 apresenta-se os modos de rotura dos diferentes painéis. No painel PP-U a rotura deu-se por corte do material do núcleo, numa superfície vertical correspondente à face das células dos favos de

mel, a cerca de 60 cm da extremidade esquerda do painel - ocorreu descolamento entre as lâminas e o núcleo que, contudo, não chegou a atingir a extremidade do painel. A rotura do painel PU-U deu-se por corte da espuma de PU, a cerca de 20 cm de uma das extremidades, tendo-se formado uma superfície de rotura com uma inclinação de aproximadamente 45° - aqui, o descolamento entre a lâmina e o núcleo ocorreu desde a zona de rotura até à extremidade do painel. No painel PP-R, a compressão da lâmina superior levou ao seu descolamento do material do núcleo na secção de meio vão. A zona descolada da lâmina começou a enrugar para o intradorso do painel, e a rotura deu-se por esmagamento das fibras no topo dessa superfície - as fissuras propagaram-se para os reforços laterais, atingindo a zona inferior dos mesmos, mas sem se propagar para a lâmina inferior. A rotura do painel PU-R foi idêntica à do painel PP-R, tendo ocorrido também na zona entre a aplicação das cargas, mas numa secção mais próxima de um dos pontos de aplicação de carga - ao contrário do painel PP-R, as fissuras da superfície enrugada propagaram-se para os reforços laterais, tendo num dos lados atingido a lâmina inferior do painel.



Fig. 7 – Modos de rotura dos diferentes painéis.

Na Tabela 6 apresenta-se, para cada um dos painéis, a força (F_u) e o deslocamento (δ_u) na rotura, a rigidez (K), a tensão longitudinal máxima nas lâminas ($\sigma_{x,max}$) e a tensão de corte máxima no material de núcleo ($\tau_{xz,max}$).

A resistência dos dois painéis não reforçados (PU-U e PP-U) foi muito seme-

Tabela 6 – Principais resultados dos ensaios de flexão aos painéis sanduíche.

Propriedade	Painel			
	PP-U	PU-U	PP-R	PU-R
F_u [kN]	28.26	31.74	72.83	86.13
δ_u [mm]	51.57	72.54	72.30	89.16
K [kN/mm]	0.665	0.536	1.084	1.246
$\sigma_{x,max}^1$ [MPa]	43.58	48.94	78.09	85.81
$\tau_{xz,max}^1$ [MPa]	0.30	0.33	-	-

¹ Valores estimadas com base na teoria da elasticidade para um modelo de viga

lhante, permitindo concluir que a resistência ao corte dos dois materiais de núcleo utilizados (que condicionou o colapso de ambos os painéis) é também muito semelhante. Relativamente aos painéis com reforços laterais, a sua resistência foi também da mesma ordem de grandeza, o que está associado ao mesmo modo de rotura por descolamento e posterior enrugamento e esmagamento da lâmina superior. É ainda de salientar o facto de a resistência dos painéis com reforços laterais ter sido consideravelmente superior à dos painéis sem reforços (158% e 171% nos painéis com núcleos de PP e PU, respectivamente).

No que diz respeito à deformabilidade, verificou-se que a rigidez do painel PP-U é superior à do painel PU-U (cerca de 24%), o que está de acordo com os ensaios de compressão, que revelaram o núcleo em PP como sendo mais rígido do que a espuma rígida de PU. Por outro lado, nos painéis reforçados a rigidez do painel PU-R foi ligeiramente superior à do painel PP-R – pensa-se que esta inversão (por comparação com os painéis não reforçados) poderá estar associada a uma maior espessura das lâminas de reforço no 1º painel. Note-se que nos painéis reforçados, o contributo do material de núcleo para a rigidez global (e, em particular, para a rigidez de corte) do painel diminui consideravelmente, já que esse contributo passa a ser dado, em grande medida, pelas bandas laterais de reforço em GFRP. Finalmente, refere-se o facto de os reforços laterais terem permitido obter aumentos significativos de rigidez (163% e 232% nos painéis com núcleos de PP e PU, respectivamente).

O facto de não ter ocorrido rotura por corte do material de núcleo nos painéis reforçados lateralmente deve-se, naturalmente, à presença dos reforços laterais.

Como seria de esperar, a presença destes elementos, que passaram a absorver uma parcela significativa do esforço de corte, permitiu diminuir consideravelmente as tensões de corte nos materiais de núcleo (este aspecto foi comprovado no estudo numérico).

3.6 - Ensaios dinâmicos de flexão dos painéis sanduíche

Nestes ensaios foi aplicada uma pancada seca, centrada ou excêntrica, na secção de meio vão dos painéis, tendo-se medido a vibração vertical com dois acelerómetros, A1 e A2, posicionados a 5 cm das extremidades laterais dessa mesma secção. Os acelerómetros, um da marca Bruel & Kjaer, modelo 4379, e outro equivalente, da marca Endevco, estavam associados a amplificadores também da marca Bruel & Kjaer, modelo 2635, sendo a precisão do conjunto de 0.01 mm. As leituras do sinal dos acelerómetros foram realizadas à taxa de 400 leituras por segundo. O registo dos valores dos aparelhos de medida foi realizado em PC por meio de uma unidade de aquisição de dados de 8 canais, de marca HBM e modelo Spider8. Foram colocados pesos sobre os painéis na zona dos apoios para evitar o seu levantamento aquando da aplicação das pancadas.

Os valores máximos das vibrações verticais registados mostram que os deslocamentos nos painéis não reforçados são superiores aos dos painéis reforçados, apesar de, nos diferentes ensaios, a carga poder não ter sido aplicada rigorosamente com a mesma intensidade. Através da análise FFT (Fast Fourier Transform) foram obtidos os valores das frequências próprias de flexão e os respectivos valores espectrais (ver Tabela 7). De entre os painéis não reforçados, a maior frequência de flexão foi observada no painel PP-U, o que poderá estar associado à maior rigidez do seu material de núcleo. A introdução dos reforços laterais aumentou a frequência de flexão para ambos os materiais de núcleo, em particular no painel com espuma rígida de PU – nestes painéis os valores da frequência foi semelhante. Nestes ensaios não foi possível determinar frequências associadas ao modo de vibração por torção.

Tabela 7 – Frequências de vibração obtidas nos ensaios dinâmicos de flexão.

Tipo de painel	Frequência [Hz]	
	Flexão	Torção
PP-U	29.84	n.r.
PU-U	24.37	n.r.
PP-R	31.54	n.r.
PU-R	31.18	n.r.

n.r. – não registado

4- ESTUDO NUMÉRICO

4.1 - Descrição dos modelos numéricos

No estudo numérico foram desenvolvidos modelos de elementos finitos tridimensionais com o programa de cálculo automático SAP2000 (versão 11.07). Devido à maior dificuldade em modelar os favos de mel em PP (quer pela sua geometria, quer por terem um comportamento anisotrópico), e por limitações de tempo, apenas foi feita a modelação dos painéis com núcleo de PU (PU-U e PU-R). De forma a reproduzir o mais fielmente possível as condições em que foram realizados os ensaios experimentais, os painéis foram modelados com as mesmas dimensões dos painéis sanduíche ensaiados à flexão. As lâminas e os reforços laterais (com 6 mm de espessura) foram modeladas com elementos finitos tipo casca (*thin shell*), enquanto que o núcleo (com 90 mm de espessura) foi modelado com elementos finitos sólidos (*solids*). Os apoios dos painéis foram materializados por elementos finitos sólidos, com a mesma largura e espessura das chapas metálicas colocadas sobre as rótulas cilíndricas e em contacto com os painéis. As condições de apoio foram definidas pelos nós centrais da face inferior daquelas chapas, sendo um dos apoios (o esquerdo) fixo e o outro (o direito) deslizante. A força total foi distribuída pela área de duas superfícies correspondente à localização das chapas metálicas utilizadas nos ensaios experimentais, posicionadas entre o sistema de aplicação da carga e a lâmina superior do painel - para esse efeito, foram aplicadas cargas de superfície na face superior daquelas áreas. Na análise dinâmica, foram consideradas massas nos nós da lâmina superior, sobre os apoios (4.55×10^{-5} kg por nó), corres-

pondentes ao peso das chapas metálicas colocadas sobre os apoios para evitar o levantamento dos painéis aquando da aplicação da pancada. Todos os materiais foram modelados assumindo a hipótese de um comportamento elástico linear (Tabela 8), isotrópico no caso da espuma de PU e ortotrópico no caso das lâminas de GFRP – foram consideradas propriedades obtidas experimentalmente e outras da bibliografia. No painel reforçado, apenas é feita a comparação dos resultados do modelo numérico com os valores experimentais, por não se dispor de expressões que traduzam o comportamento de um painel com reforços laterais. Já no painel não reforçado, os resultados obtidos são comparados com os valores experimentais e os obtidos com base em expressões analíticas.

Tabela 8 – Propriedades dos materiais modelados.

Propriedade	Material	
	GFRP	PU
ρ [kg/m ³]	1582	69.7
E_1, E_2 [MPa]	20×10^3	16.9
E_3 [MPa]	7.5×10^3	16.9
G_{12}, G_{13}, G_{23} [MPa]	3.5×10^3	6.5
ν_{12} [-]	0.3	0.3
ν_{13}, ν_{23} [-]	0.1	0.3

4.2 - Comportamento em serviço

Ambos os painéis foram carregados com uma carga distribuída de 100 kN/m², equivalente a uma carga total de 10 kN, correspondente ao troço linear do diagrama força-deslocamento do painel (ver Fig. 6).

Os deslocamentos a meio vão fornecidos pelo modelo, quer do painel PU-U, quer do painel PU-R, são da mesma ordem de grandeza que os deslocamentos obtidos experimentalmente, tendo-se verificado, para os dois tipos de painel, que o modelo numérico (e também o modelo analítico, no caso do painel PU-U) apresenta uma rigidez ligeiramente inferior à do painel ensaiado. O erro foi de cerca de 15.5% no painel PU-U e de cerca de 26.2% no painel PU-R, o que é aceitável face à incerteza em algumas propriedades dos materiais, em especial da espuma rígida de PU e da espessura das lâminas e reforços laterais (que, de acordo com medições realizadas, terá sido ligeiramente superior ao valor de 6 mm admitido no modelo).

As extensões no painel PU-U, quer de tracção (lâmina inferior), quer de compressão (lâmina superior), apresentam-se relativamente próximas dos valores experimentais, sendo os valores mais reduzidos (em módulo) dessas extensões fornecidos pelo modelo numérico (com um erro de 7.7% e de 11.1% relativamente às extensões negativas e positivas, respectivamente) e os mais elevados (em módulo) pela expressão teórica (com um erro de 4.1% e de 14.6% relativamente às extensões negativas e positivas, respectivamente). No painel PU-R, as extensões obtidas através do modelo numérico afastam-se consideravelmente das curvas experimentais, mas tal deve-se a erros de leitura dos extensómetros colados neste painel, associados a uma deficiente colagem e também ao descolamento entre a lâmina superior e o material de núcleo, que influenciaram a qualidade dos resultados obtidos.

4.3 - Análise de sensibilidade

Dada a referida incerteza em alguns parâmetros do modelo, foi realizada uma análise de sensibilidade. No painel PU-U, o incremento do módulo de elasticidade da espuma rígida de PU fez aproximar o valor do deslocamento a meio vão obtido no modelo numérico do valor experimental. Já a variação do módulo de elasticidade das lâminas de GFRP teve um efeito sensivelmente mais reduzido nesse deslocamento. No painel PU-R, pelo contrário, a variação do módulo de elasticidade da espuma de PU teve uma influência muito reduzida no deslocamento a meio vão do painel, o que mostra que a sua deformação é sobretudo condicionada pelas lâminas de reforço. Já a variação do módulo de elasticidade das lâminas de GFRP revela um efeito importante no comportamento do painel, sendo que o efeito da sua variação no deslocamento a meio vão no painel PU-R foi cerca de o dobro do observado no painel PU-U. A variação do módulo de distorção das lâminas de GFRP no painel reforçado teve algum efeito na deformação, ao contrário do que aconteceu no painel PU-U, onde não se verificou qualquer influência (como seria aliás de esperar). Conclui-se, assim, que os reforços laterais

contribuem consideravelmente para a rigidez do painel e têm um papel relevante no comportamento do painel em serviço. De referir ainda que a variação da espessura das lâminas e dos reforços laterais teve uma influência significativa no deslocamento a meio vão dos painéis. Deste modo, a incerteza associada à espessura das lâminas (e dos reforços laterais no caso do painel PU-R) dos painéis ensaiados pode ser uma das razões da diferença entre os valores experimentais e os obtidos com os modelos numérico e teórico.

4.4 - Comportamento à rotura

As curvas do deslocamento a meio vão do modelo analítico e do modelo numérico do painel PU-U apresentam-se quase coincidentes, mas com uma rigidez que, no patamar elástico-linear, é inferior à da curva experimental. Já a diferença entre os deslocamentos máximos numérico e experimental foi de apenas cerca de 6%. Na realidade, o painel ensaiado apresentou um comportamento não-linear a partir de valores de carga de aproximadamente 20 kN, com um aumento significativo dos deslocamentos que, assim, se foram aproximando dos valores numéricos. No painel PU-R, a curva do deslocamento a meio vão do modelo numérico encontra-se também abaixo da curva experimental no troço aproximadamente linear, sendo os deslocamentos experimentais na rotura inferiores aos calculados em cerca de 10%. Neste painel também se pode concluir que o modelo reproduz com uma precisão aceitável (embora inferior à do painel PU-U) o seu comportamento próximo da rotura, no que respeita aos deslocamentos máximos atingidos. Pensa-se que a consideração das propriedades não lineares da espuma rígida de poliuretano e uma maior homogeneidade da espessura das lâminas de GFRP (que depende da melhoria do processo de fabrico) permitirão no futuro melhorar o rigor dos modelos numéricos.

Relativamente às tensões obtidas nos modelos numéricos, verifica-se que as tensões de corte no núcleo do painel PU-R são aproximadamente uniformes ao longo da altura do painel mas, como seria de esperar, variam ao longo da largura, apre-

sentando valores inferiores junto aos bordos (Fig. 8). Na realidade, tal deve-se ao facto de os reforços laterais absorverem uma parte significativa dos esforços de corte. De facto, no painel PU-U a tensão máxima de corte calculada no modelo numérico para a força de rotura foi o dobro da correspondente tensão de corte no painel PU-R, o que justifica a não ocorrência de rotura por corte do material de núcleo neste último painel.

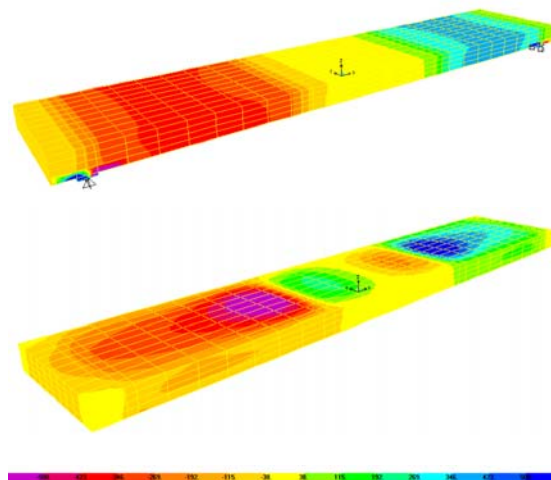


Fig. 8 - Tensões de corte τ_{xz} no material de núcleo dos painéis PU-U (em cima) e PU-R (em baixo).

4.5 - Comportamento dinâmico

As frequências de flexão obtidas no modelo são próximas das registadas nos ensaios experimentais, com erros muito reduzidos de 0.5% no painel PU-U, e aceitáveis de 17.4% no painel PU-R (Tabela 9). Não foi possível realizar uma comparação das frequências de torção, uma vez que estas não foram detectadas nos ensaios experimentais.

Tabela 9 – Frequências próprias de vibração.

Painel	Origem	Modo de vibração	
		Flexão	Torção
PU-U	Modelo	24.20	52.6
	Ensaio	24.37	n.r.
PU-R	Modelo	35.50	102.6
	Ensaio	31.18	n.r.

n.r. - não registado

5- CONCLUSÕES

O presente estudo revelou que os painéis sanduíche compósitos com lâminas de GFRP e núcleos em espuma rígida de

PU ou em favos de mel de PP apresentam potencial para serem aplicados como elementos estruturais, com rigidez e resistência significativas, em particular quando reforçados lateralmente com lâminas de GFRP. Do estudo analítico, experimental e numérico realizado, referem-se as seguintes conclusões:

1. Os painéis ensaiados à flexão apresentaram um comportamento elástico linear, com uma ligeira perda de rigidez próximo da rotura;
2. Os painéis com núcleo de favos de mel de PP não reforçados lateralmente têm uma rigidez mais elevada que os painéis com núcleo de espuma rígida de PU;
3. Os deslocamentos a meio vão dos painéis podem ser estimados através de expressões simples, sendo que a deformação por corte não deve ser desprezada;
4. O comportamento à rotura dos painéis não reforçados é condicionado pela resistência do material do núcleo e o dos painéis com reforços laterais é condicionado pela resistência da ligação entre o materiais de núcleo e as lâminas superiores e, posteriormente, pela resistência à compressão das lâminas superiores;
5. A introdução dos reforços laterais tem um efeito importante no comportamento do painel: (i) aumentou consideravelmente a rigidez, diminuindo a deformação dos painéis; (ii) aumentou significativamente a resistência à rotura, absorvendo uma parte considerável dos esforços, em especial os do núcleo; e (iii) alterou as frequências próprias de vibração;
6. Os modelos numéricos desenvolvidos, calibrados com os resultados experimentais, são capazes de simular, com uma boa precisão, o comportamento mecânico estático e dinâmico dos painéis sanduíche em serviço e à rotura.

6- REFERÊNCIAS

- Allen, H. G. 1969. Analysis and design of structural sandwich panels, Pergamon Press, Oxford, 283 p.
- Almeida, I.A. 2009. Comportamento estrutural de painéis sanduíche compósitos para aplicações na indústria da construção, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, IST.
- ASTM C364-99 1999. Standard test method for edgewise compressive properties of sandwich constructions.
- ASTM C365-03 2003. Standard test method for flatwise compressive properties of sandwich cores.
- ASTM C393-00 2000. Standard test method for flexural properties of sandwich constructions.
- Davies, J.M. 2001. Lightweigh Sandwich construction. Blackwell Science, Oxford, 370 p.
- Hassan, T. K., Reis, E. M., Rizkalla, S. 2003. Innovative 3-D FRP sandwich panels for bridge decks, CD-ROM Proceedings of the 5th Alexandria International Conference on Structural and Geotechnical Engineering, Alexandria, Egypt.
- Hexcel Composites 2000. Honeycomb sandwich design technology, 28 p.
- ISO 527 1997. Determination of Tensile Properties – Part 1: General Principles. Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites.
- Lascoup, B., Aboura, Z., Khellil, K., Benzeggagh, M. 2006. On the mechanical effect of stitch addition in sandwich panel, Composites Science and Technology, 66 (10), p. 1385-1398
- Leite, M., Freitas, M., Silva, A. 2004. Sandwich construction, Apresentação IST, DesignStudio.
- Potluri, P., Kusak, E. e Reddy, T.Y. 2003. Novel stitch-bonded sandwich composite structures, Composite Structures, 59 (2), p. 251-259.
- Sharaf, T., Fam, A. 2008. Flexural load tests on sandwich wall panels with different rib configurations, CD-ROM Proceedings of the 4th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2008), Zurich, Switzerland.