

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE PAINÉIS SANDWICH COM LÂMINAS DE GFRP E NÚCLEO DE POLIURETANO

Gonçalo Escusa*

Investigador
ISISE/Universidade do Minho
g.escusa@civil.uminho.pt

Julio Garzón-Roca

Pos-Doutorando
ISISE/Universidade do Minho
jgarzonroca@civil.uminho.pt

Hassan Abdolpour

Aluno de doutoramento
ISISE/Universidade do Minho
h_abdolpour@civil.uminho.pt

José Sena-Cruz

Professor Associado
ISISE/Universidade do Minho
jsena@civil.uminho.pt

Joaquim Barros

Professor Catedrático
Universidade do Minho
ISISE, Guimarães
barros@civil.uminho.pt

Isabel Valente

Professor Auxiliar
Universidade do Minho
ISISE, Guimarães
isabelv@civil.uminho.pt

David Martins

Investigador
ICIST, IST
Universidade de Lisboa
davidjmmartins@gmail.com

João R. Correia

Professor Associado
ICIST, IST
Universidade de Lisboa
joao.ramoa.correia@tecnico.ulisboa.pt

Fernando A. Branco

Professor Catedrático
ICIST, IST
Universidade de Lisboa
fernando.branco@tecnico.ulisboa.pt

SUMÁRIO

Neste trabalho apresentam-se os resultados de um programa experimental realizado no piso da laje de um protótipo destinado a habitações de emergência em materiais compósitos. Este piso é constituído por painéis sandwich, com lâminas de GFRP e núcleo de poliuretano, apoiados em vigas e pilares em perfis pultrudidos em GFRP. O trabalho realizado tem como objetivo fundamental o estudo do comportamento estrutural do piso, incluindo a determinação de parâmetros modais dos painéis sanduíche analisados.

Palavras-chave: Painéis sandwich, lâminas de GFRP, núcleo de poliuretano, habitação de emergência.

1. INTRODUÇÃO

Em meados do séc. XX, face às necessidades sentidas pela indústria aeronáutica de reduzir os consumos de combustível, tornou-se imprescindível o desenvolvimento de novas soluções estruturais que permitissem aligeirar a fuselagem dos aviões. O recurso a materiais compósitos demonstrou ser uma alternativa viável face às exigências impostas pela indústria da aviação [1]. Esta nova solução tecnológica revelou ser de tal forma promissora, que rapidamente outros ramos da engenharia tais como a indústria naval, automóvel e da construção começaram a implementar soluções estruturais com recurso a materiais compósitos [1, 2].

Entende-se por materiais compósitos todo o tipo de soluções compostas por dois ou mais materiais num mesmo elemento, com propriedades mecânicas ou químicas significativamente

distintas. Um exemplo muito comum são os painéis sandwich [3], constituídos por (i) duas camadas exteriores de espessura reduzida, responsáveis por conferir resistência à flexão ao painel, e por (ii) um núcleo interior de maior leveza e espessura, cuja função principal é resistir aos esforços transversos. Tipicamente, a ligação entre as camadas exteriores e o núcleo é feita através de um adesivo, que permite evitar a sua inter-delaminação [2, 4, 5].

Quando comparados com outras soluções convencionais, os painéis sandwich distinguem-se pela sua leveza e elevada resistência. São também capazes de proporcionar elevado isolamento térmico, estanquidade, durabilidade e algum isolamento acústico [2]. Geralmente, os núcleos podem ser constituídos por elementos corrugados (Figura 1a), por uma camada homogénea de um determinado material de muito reduzida (Figura 1b), como é o caso do poliestireno extrudido (XPS) ou do poliuretano, ou por um núcleo em forma de favos de colmeia (Figura 1c) [5].

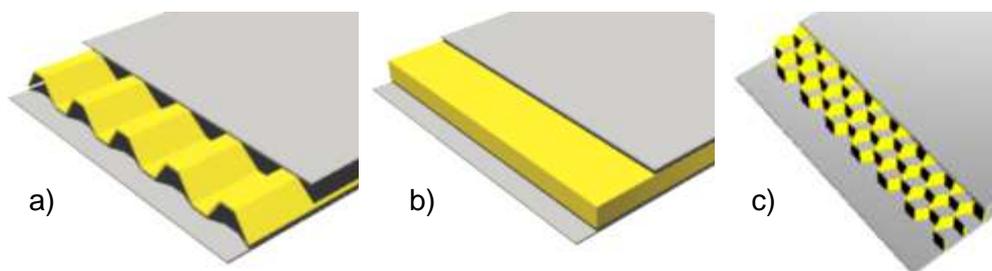


Figura 1. Exemplos de tipologias de painéis sandwich.

Ao longo dos últimos anos, de forma a aumentar a sua competitividade no mercado em relação a outras soluções/materiais existentes, a investigação desenvolvida no âmbito de painéis sandwich tem-se concentrado na proposta de soluções que procuram otimizar as suas propriedades mecânicas e o seu desempenho estrutural. Neste contexto, salientam-se diversos investigadores pelos trabalhos desenvolvidos nesta área como é o caso de Allen [3] pela bibliografia produzida na conceção e dimensionamento de painéis sandwich, Davies [2] pela investigação produzida sobre execução de elementos sandwich, Bank [6] pelo diverso trabalho de investigação produzido no âmbito da aplicação de materiais compósitos na construção e Hollaway [7] pelo estudo da aplicação de polímeros e compósitos na construção. Destacam-se também Frostig *et al.* [8, 9] em estudos experimentais de flexão, esmagamento e delaminação em painéis sandwich, Reddy e Barbero *et al.* [10, 11] pelas teorias e estudos do comportamento de painéis sandwich, Petrone *et al.* [12] pela caracterização modal de painéis sandwich com núcleos reciclados, Lameiras *et al.* [13, 14] pelo desenvolvimento de painéis sandwich com lâminas exteriores de betão, camada interna de poliuretano e conectores de polímero reforçado com fibras para utilização em paredes de construção modular, bem como Correia *et al.* [4] pelos estudos sobre o comportamento de painéis sandwich com núcleos homogéneos e favos de colmeia em poliuretano e polipropileno, respetivamente.

No presente trabalho apresenta-se um programa experimental desenvolvido com painéis sandwich a serem utilizados num protótipo de habitação de emergência em materiais compósitos, constituídos por duas camadas exteriores de GFRP e um núcleo de poliuretano (PU). O objetivo deste estudo centra-se fundamentalmente em: (i) avaliar a aplicabilidade da solução proposta no protótipo de habitação de emergência; (ii) avaliar a sua resposta estrutural global para cenários de estado limite de utilização (SLS); e (iii) determinar os parâmetros modais de modo a avaliar condições regulamentares e de conforto.

2. PROCESSO DE FABRICO DOS PAINÉIS

2.1 Fabrico dos painéis sandwich

Os painéis sandwich foram produzidos pela empresa ALTO - Perfis Pultrudidos Lda. O processo de fabrico envolve quatro fases, ilustradas na Figura 2a. A fase inicial consistiu na construção de um aro em perfis pultrudidos em GFRP com secção em “U”. Este aro tem como função permitir a ligação entre painéis sandwich adjacentes e a ligação entre painéis sandwich e a restante estrutura que constitui o protótipo da habitação de emergência. Seguiu-se a produção das lâmina em GFRP através do método *hand lay-up*, i.e., cada camada de fibra de vidro foi impregnada manualmente com resina de poliéster. Estas lâminas em GFRP, de 5 mm de espessura, são constituídas por uma matriz de poliéster reforçada com mantas de fibra de vidro com volume total de fibras compreendido entre 30% a 40% (ver Figura 2b). Por fim, os blocos de PU, com 60 mm de espessura e densidade de 48 kg/m³, foram colocados no interior dos painéis, ficando confinados pelas lâminas de GFRP (na face superior e inferior) e pelo aro de GFRP (no contorno).

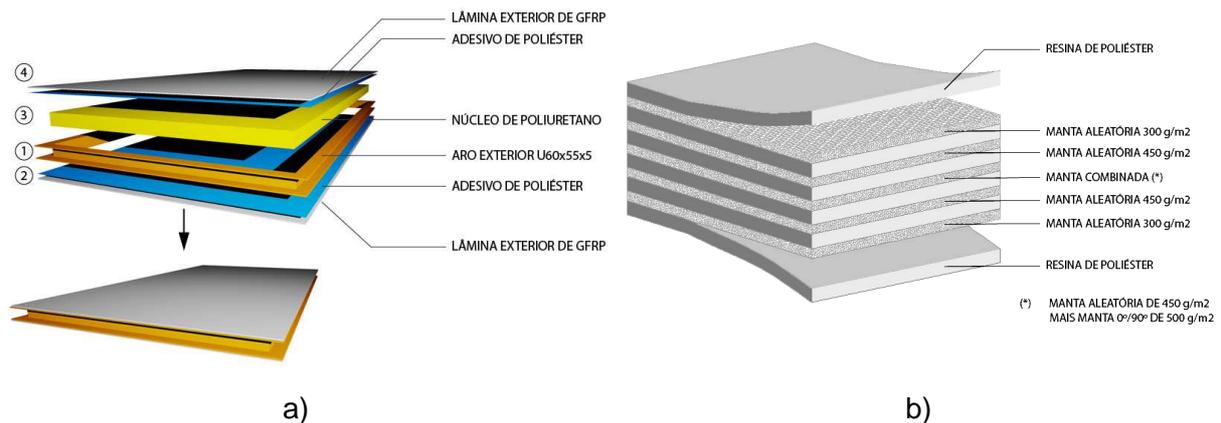


Figura 2. Constituição dos painéis sandwich.

2.2 Geometria do protótipo de ensaio

A estrutura da habitação de emergência é constituída por quatro pilares e quatro vigas, materializados com perfis pultrudidos em GFRP, e dois painéis sandwich que constituem a laje de piso. A altura total deste protótipo é 1 m, com o eixo baricêntrico das vigas que

suportam os painéis situado a 0.50 m de altura. A Figura 3 apresenta a geometria global da estrutura ensaiada, a pormenorização dos pilares e vigas utilizados, e o encaixe dos painéis sandwich na estrutura porticada em GFRP.

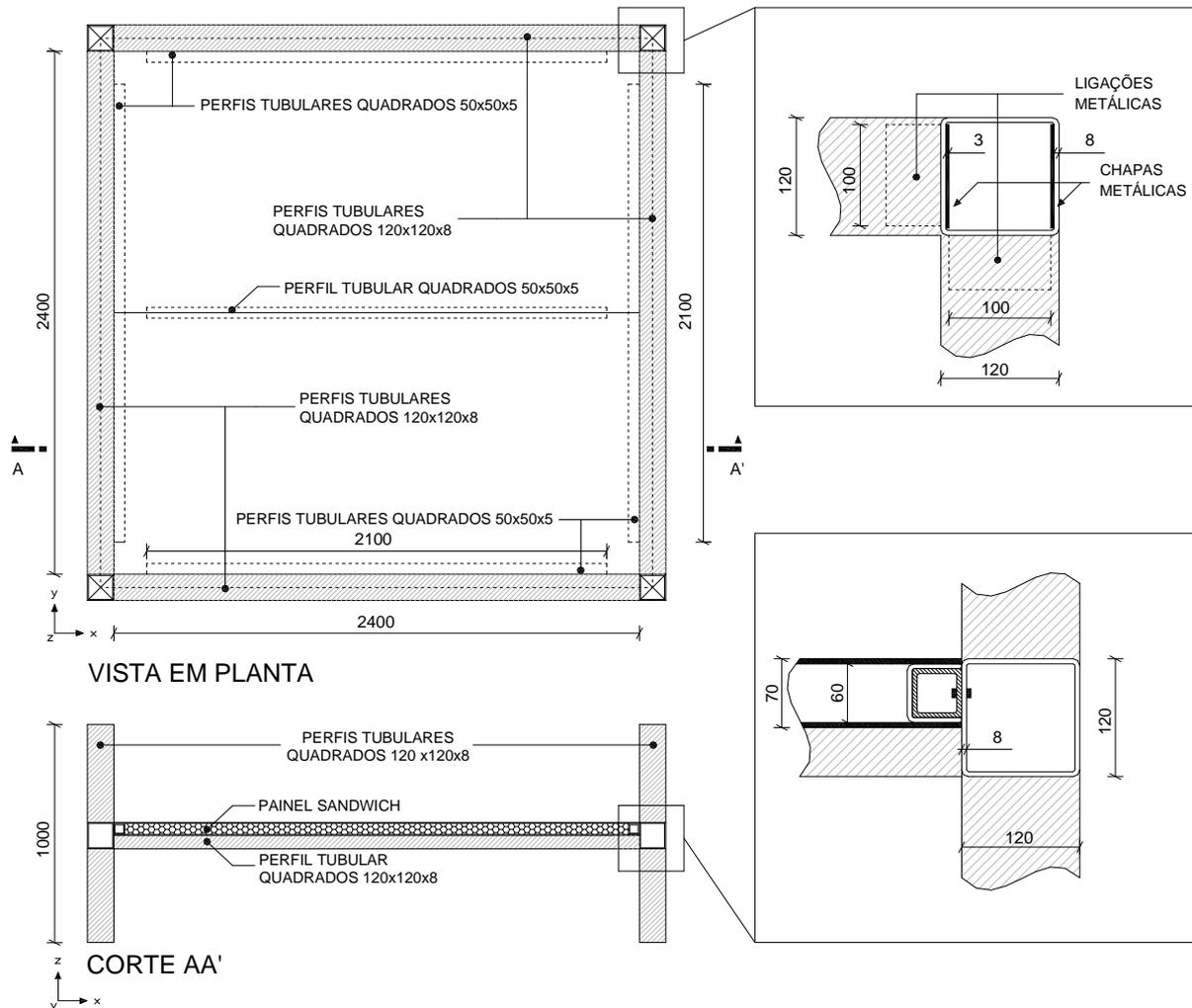


Figura 3. Vista em planta e corte da estrutura (cotas em milímetros).

A Figura 4 ilustra a configuração em planta dos painéis e pormenoriza tanto as ligações entre painéis como as zonas do painel que fazem a ligação com os elementos do pórtico. Os painéis sandwich têm dimensões em planta de 1200 x 2400 mm² e encaixam na restante estrutura através do aro de GFRP, constituído por um perfil em U 60x55(x5) mm² (ver Secção 2.1). O perfil “U” do painel encaixa num perfil tubular quadrado com dimensões de 50x50(x5) mm² que se encontra fixo às vigas, tal como representa a Figura 3. Entre painéis, a ligação é semelhante à anterior, como se ilustra no corte BB’ da Figura 4.

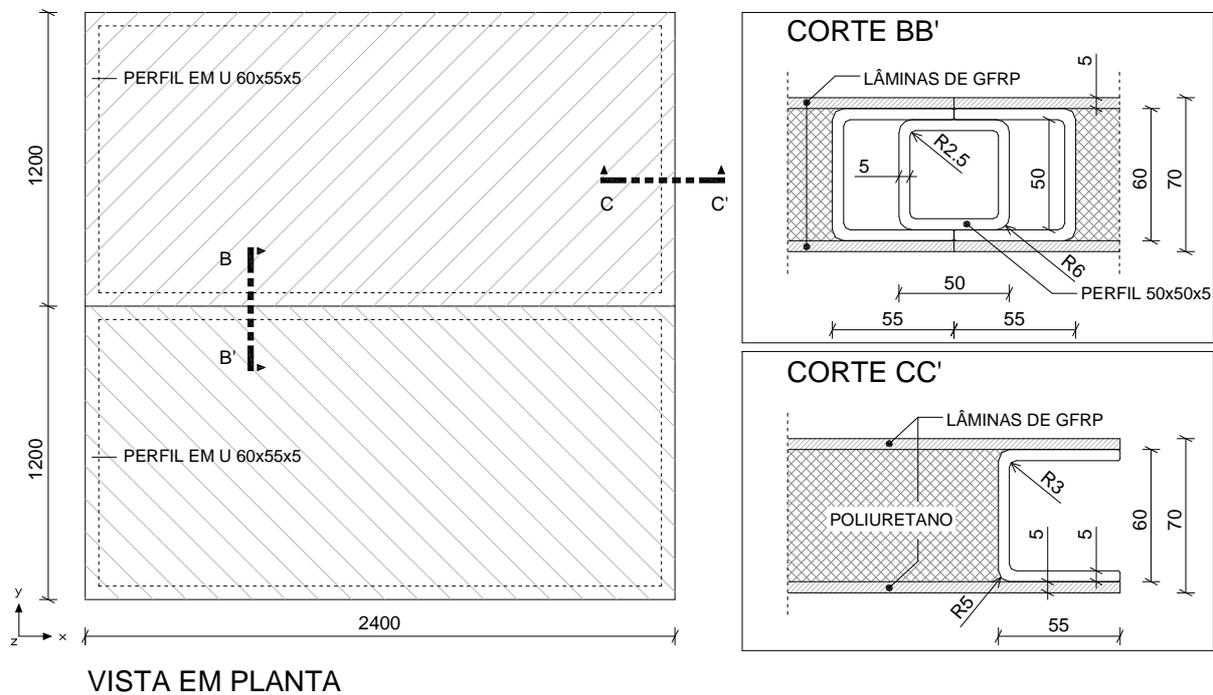


Figura 4. Vista em planta e em corte dos painéis. Nota: cotas em milímetros.

A montagem da estrutura consistiu em três etapas, apresentadas na Figura 5: (i) montagem de 3/4 da estrutura porticada (Figura 5a); (ii) instalação dos dois painéis sandwich (Figura 5b); (iii) instalação da viga em GFRP em falta da estrutura porticada (Figura 5c).

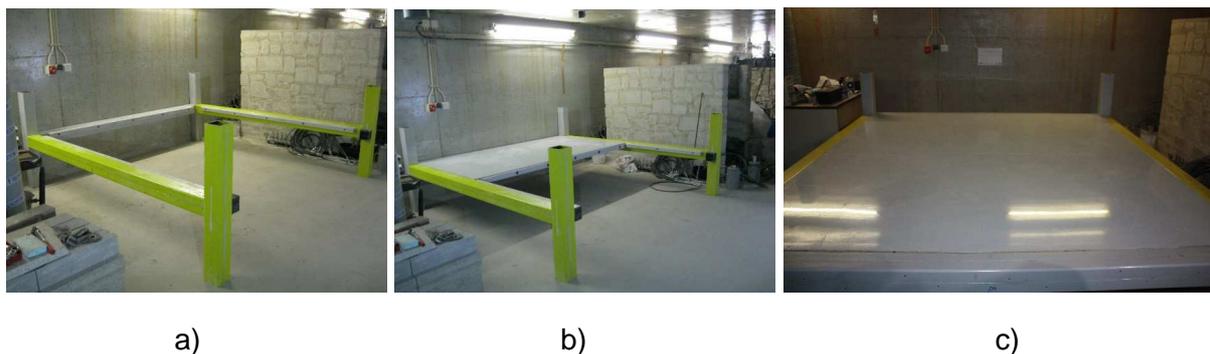


Figura 5. Processo de montagem da estrutura de piso da habitação de emergência.

O protótipo de ensaio incluiu apenas a componente da estrutura que constitui o pavimento e apresenta uma área quadrada em planta de aproximadamente 7 m².

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Caracterização dos materiais

Para a caracterização dos materiais, realizaram-se ensaios de tração em amostras retiradas das lâminas de GFRP dos painéis, em ambas as faces e direções, i.e. longitudinal (direção X – ver Figura 4) e transversal (direção Y – ver Figura 4). Estes ensaios foram realizados seguindo os procedimentos preconizados na norma ISO 527-4:1997 [15]. Realizaram-se também ensaios de compressão a provetes do material utilizado no núcleo dos painéis sandwich, em conformidade com a norma ASTM C 365 – 03 [16].

3.1.1 Caracterização da resistência à tração das lâminas de GFRP

Para este ensaio, utilizaram-se lâminas de GFRP com dimensões de 250x25x5 mm³, seguindo o modelo “tipo 3” da norma ISO 527-4:1997. A extração das amostras das lâminas dos painéis sandwich foi feita por corte a seco, utilizando uma serra de diamante vertical. Para prevenir a rotura prematura na zona de fixação do provete à amarra do equipamento de ensaio, foram colocadas lâminas (*tabs*) em alumínio com 2 mm de espessura e 50 mm de comprimento, em ambas as faces das extremidades dos provetes, com recurso a um adesivo e procedimentos de colagem adequados. A Figura 6a esquematiza as dimensões adotadas para as amostras de ensaio. Foram utilizados os seguintes equipamentos de ensaio: (i) uma máquina de ensaios universal com uma célula de carga com capacidade até 200 kN e precisão ± 0.12 kN; (ii) um extensómetro axial *Clip-On* MFA-12 da Walter+Bay com precisão ± 1 $\mu\text{m/m}$; e (iii) um extensómetro transversal, produzido pela Sokki Kenkyujo Co. Ltd, modelo BFLA-5-3, com um comprimento de 12.5 mm e precisão de ± 0.85 $\mu\text{m/m}$. O uso deste último extensómetro teve como objetivo estimar o coeficiente de Poisson. A Figura 6b ilustra um provete instalado na prensa universal e pronto a ser ensaiado.

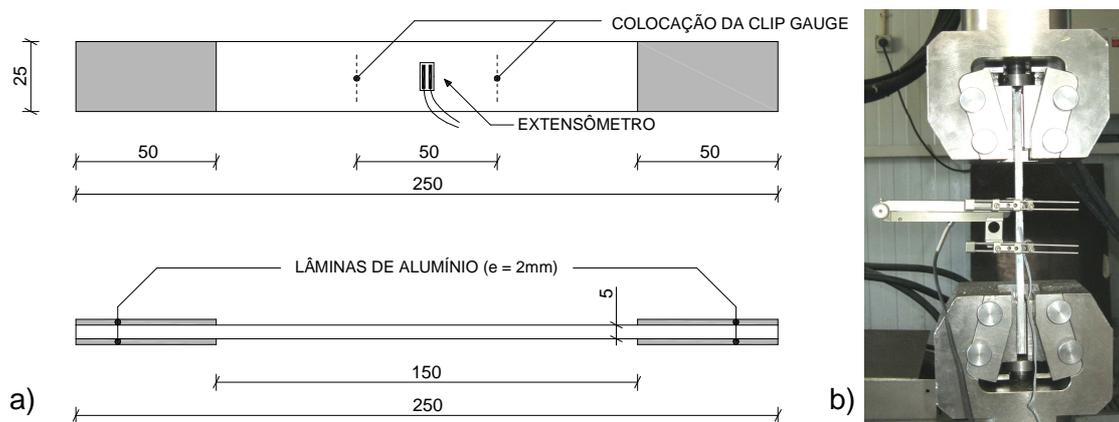


Figura 6. Ensaio de tração: (a) dimensões das amostras de GFRP, e (b) exemplo de fixação para ensaio. Nota: cotas em milímetros.

No total realizaram-se 14 ensaios monotónicos à rotura, a uma velocidade de 2 mm/min, nas amostras extraídas das lâminas de GFRP dos painéis sandwich. A Figura 7 apresenta os

modos de rotura obtidos nas amostras ensaiadas, podendo-se observar que, de um modo geral, a rotura ocorreu numa zona suficientemente afastada das garras.



Figura 7. Amostras de GFRP ensaiadas: modos de rotura.

3.1.2 Caracterização da resistência à compressão do poliuretano

Foi caracterizada a resistência à compressão da espuma de poliuretano de 4 amostras retiradas do núcleo dos painéis sandwich, com dimensões de $70 \times 70 \times 50 \text{ mm}^3$. O ensaio foi conduzido com o mesmo equipamento utilizado nos ensaios de caracterização da resistência à tração das lâminas de GFRP (ver Secção 3.3.1). A velocidade de ensaio foi 0.50 mm/min . A Figura 8 ilustra uma das amostras durante a fase de ensaios e o conjunto de amostras testadas no final dos mesmos.



Figura 8. Amostras de PU ensaiadas: (a) durante o ensaio; (b) após ensaio.

3.2 Ensaios estáticos

O programa de ensaios de carga realizados sobre a estrutura teve como objetivo analisar o comportamento global da estrutura, quando esta é submetida a ações gravíticas uniformemente distribuídas sobre os painéis sandwich. Realizaram-se quatro ensaios estáticos com configurações de carregamento diferentes, divididos por zonas como mostra a Figura 9a e como se resume no Quadro 1. O carregamento foi efetuado com sacos de

carbonato de 25 kg cada, colocados manualmente no mais curto espaço de tempo possível, de modo a minimizar os efeitos de fluência.

A estrutura foi instrumentada com recurso a 7 LVDT's da marca RDP, com campos de medida que variaram entre 25 mm e 50 mm, de modo a medir os deslocamento verticais em distintas partes da estrutura (estrutura porticada e painéis sandiwch), dispostos da forma ilustrada na Figura 9b. Adicionalmente, foram também utilizados 8 extensómetros (com características iguais aos utilizados nos ensaios descritos na Secção 3.1.1), para medir as extensões de tração de diferentes pontos da estrutura porticada em GFRP e dos painéis sandwich, colados na face inferior, como se ilustra também na Figura 9b. Para a aquisição do sinal proveniente dos LVDT's, foi utilizado um sistema de aquisição da *National Instruments* (NI), modelo NI SCXI 1001, com um módulo NI SCXI 1540, de 8 canais. No mesmo equipamento, utilizou-se um módulo NI SCXI 1520, de 8 canais, ligados em quarto de ponte, para a leitura dos extensómetros. Durante os ensaios foi também utilizada uma UPS para estabilização da fonte de alimentação do equipamento de aquisição, de forma a evitar o aparecimento de ruídos parasita durante a aquisição de sinais provenientes dos diferentes sensores.

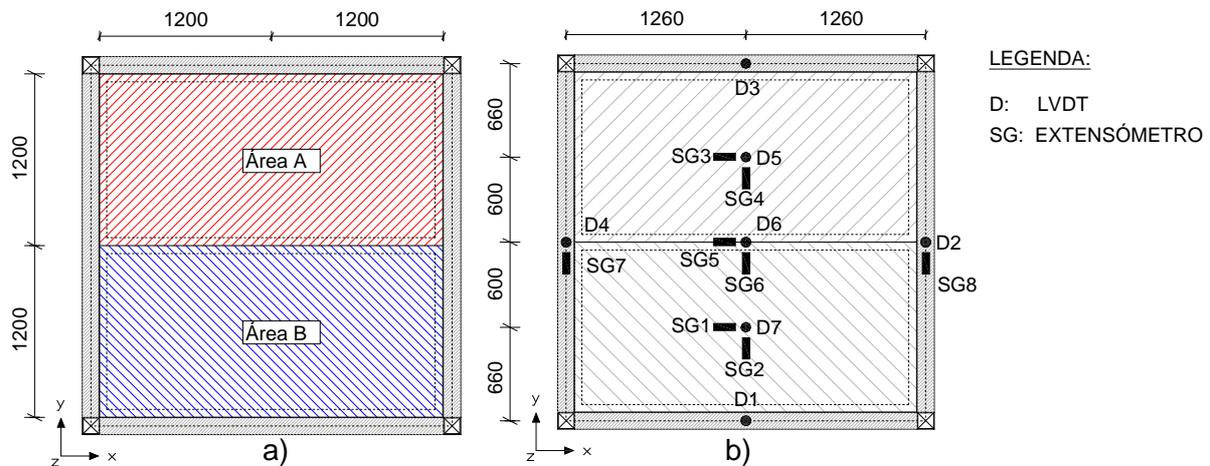


Figura 9. Divisão em áreas (a) e localização dos transdutores (b) para os ensaios estáticos.

Quadro 1. Carga aplicada nas várias fases de cada ensaio (valores em kN/m²).

FASE	Ensaio E1		Ensaio E2		Ensaio E3		Ensaio E4	
	Área A	Área B						
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	1.00	0.00	1.00	0.00	2.00	0.00	1.00	1.00
3	2.00	0.00	1.00	1.00	2.00	2.00	2.00	2.00
4	2.00	1.00	2.00	1.00	0.00	2.00	1.00	1.00
5	2.00	2.00	2.00	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	2.00	1.00	2.00	1.00				
7	2.00	0.00	1.00	1.00				
8	1.00	0.00	1.00	0.00				
9	0.00	0.00	0.00	0.00				

3.3 Ensaio de vibração ambiental

Este ensaio tem como propósito determinar os parâmetros modais dos painéis sandwich instalados na estrutura, i.e., caracterizar as frequências de vibração naturais, coeficientes de amortecimento e modos de vibração. Para este efeito, apenas é necessário registar a vibração natural da estrutura, tendo-se optado por fazê-lo em períodos de inatividade no laboratório de forma a evitar o aparecimento de frequências de banda ou sinais ruidosos provocados pela circulação de peões ou utilização de máquinas e equipamentos.

Utilizaram-se 7 acelerómetros piezoelétricos PCB®, modelo 393B12, com uma sensibilidade de 10 V/g, gama de frequências entre 0.15 Hz a 1 kHz e gama de acelerações até 0.5 g. O sistema de aquisição era composto por um sistema NI SCXI 1001, com um módulo de controlo NI SCXI 1600 e com um módulo NI SCXI 1531 de 8 canais, conectado através de cabos coaxiais aos transdutores de acelerações. Os acelerómetros foram posicionados a meio e quartos de vão de painéis e vigas, de modo a possibilitar uma boa representação dos modos de vibração. A Figura 10 apresenta uma vista em planta da localização dos acelerómetros na estrutura.

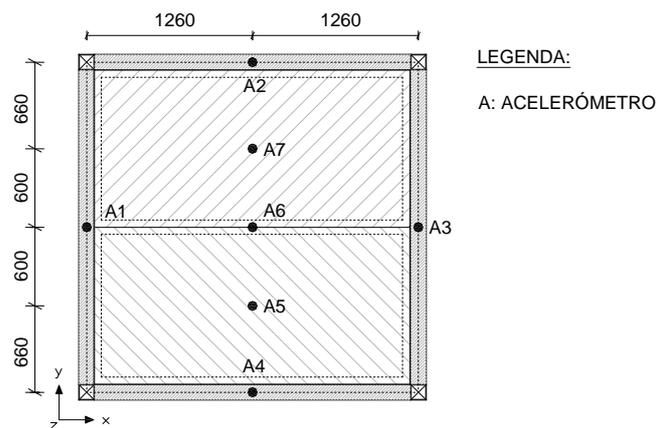


Figura 10. Localização dos acelerómetros.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1 Resultados da caracterização dos materiais

4.1.1 Resistência à tração das lâminas de GFRP

A Figura 11a e a Figura 11b apresentam os resultados dos ensaios de tração uniaxial realizados nas amostras extraídas das lâminas de GFRP da face superior (S) e inferior (I) dos painéis, na direção longitudinal (L – direção X, de acordo com a Figura 4) e transversal (T – direção Y, de acordo com a Figura 4), respetivamente.

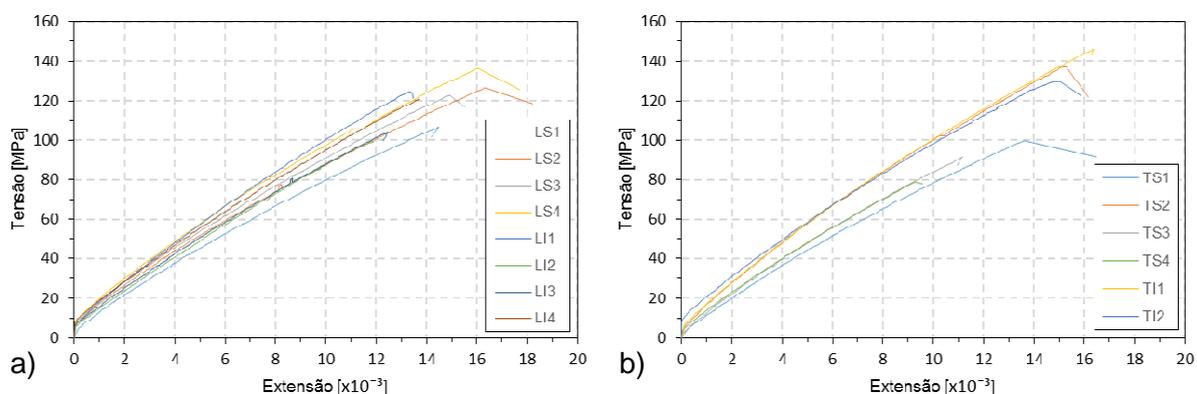


Figura 11. Ensaio de tração realizados nas amostras de GFRP.

Dos resultados obtidos conclui-se as lâminas de GFRP que constituem os painéis sandwich apresentam um comportamento muito ligeiramente ortotrópico, dado que o módulo de elasticidade é de 9.64 ± 0.66 GPa e 10.02 ± 0.92 GPa, para as direções longitudinal e transversal, respetivamente. Refira-se que estes valores se encontram em concordância com modelo teórico proposto por Pan [17], a partir do qual foi possível estimar um módulo de elasticidade teórico de 11.05 GPa para um volume de fibras igual a 30% (tal como indicado na Secção 2.1).

A tensão de rotura obtida para as lâminas de GFRP foi 117.67 ± 12.00 MPa e 112.25 ± 22.45 MPa para as direções longitudinal e transversal, respetivamente, e o coeficiente de Poisson foi aproximadamente 0.26. Também se pode concluir que o comportamento das lâminas é praticamente linear-elástico até à rotura.

A Figura 12 apresenta os resultados dos ensaios de compressão realizados nas amostras de PU em termos da relação entre tensão e extensão axial. Como se pode observar a partir desta figura, o PU apresenta um comportamento linear até uma extensão próxima dos 3% a partir da qual exibe um comportamento plástico com uma tensão progressivamente crescente. Com base nestes resultados obtidos, pode concluir-se que o PU apresenta um módulo de elasticidade em compressão igual a 9.26 ± 0.50 MPa e uma tensão de cedência de 0.30 ± 0.02 MPa.

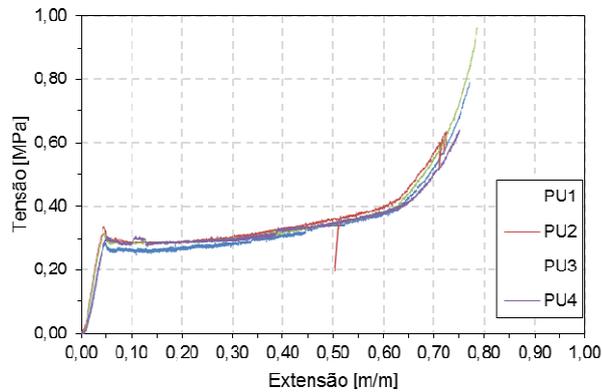


Figura 12. Ensaios de compressão no PU.

4.2 Resultados dos ensaios estáticos

Os resultados dos ensaios estáticos são apresentados de forma sequencial da Figura 13 à Figura 16, respetivamente, para os ensaios E1, E2, E3 e E4 (ver Quadro 1). A aquisição de dados foi realizada a uma frequência de amostragem de 1 Hz e entre ensaios garantiu-se um período de “recobro” da estrutura de trinta minutos, de forma a recuperar eventuais deformações de fluência.

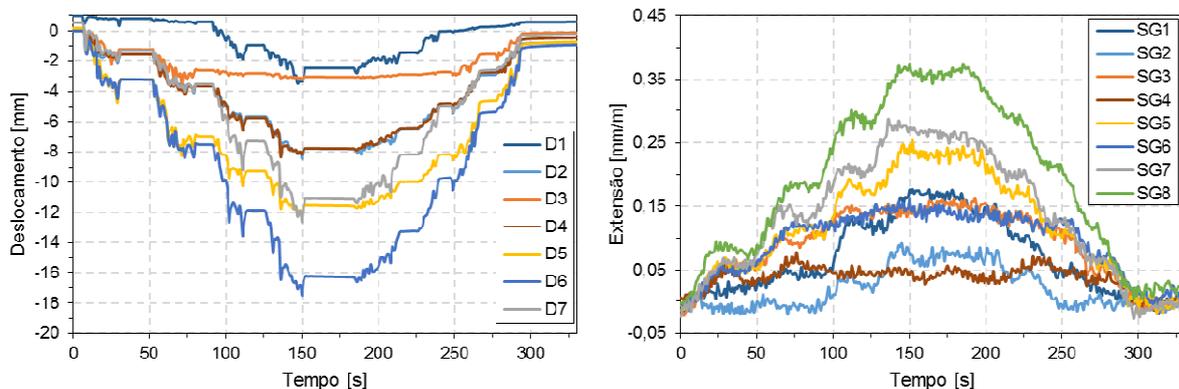


Figura 13. Resultados para o ensaio E1.

A partir dos resultados obtidos no ensaio E1 (Figura 13), pode observar-se que a flecha instantânea a meio vão (LVDT D6 – ver Figura 9b) para um carregamento de 2 kN/m² é de aproximadamente 16 mm. No entanto, tendo em conta os deslocamentos ocorridos nas vigas, medidos pelos LVDTs D2 e D4, a deformação máxima relativa nos painéis foi de aproximadamente 8 mm. A extensão máxima de tração registada nos painéis foi de aproximadamente 0.25 mm/m, correspondente ao extensómetro SG5 (ver Figura 9b). Esta

extensão corresponde a uma tensão de cerca 2.41 MPa, calculada tendo em conta o valor do módulo de elasticidade longitudinal obtido nos ensaios de caracterização nas lâminas de GFRP (ver Secção 4.1.1.). Conclui-se assim que os níveis de tensão normal instantânea instalados nos painéis para a sobrecarga característica (i.e. em SLS) são muito reduzidos e muito inferiores ao seu valor máximo (cerca de 118 MPa).

A partir destes gráficos é também possível concluir que nas diferentes configurações de carga aplicadas, a flecha máxima (de 16 mm) não sofre qualquer alteração significativa. Desta forma, verificou-se que o sistema de fixação utilizado para a ligação entre painéis e entre painéis e a estrutura porticada em GFRP não é influenciado pelos diferentes tipos de carregamento, para além de apresentar comportamento elástico.

Em termos da estrutura porticada, conclui-se que esta é mais rígida na direção X, correspondente a um funcionamento dos painéis sandwich com predominância de 60% a 70% na direção longitudinal.

Relativamente à deformação máxima regulamentar para um horizonte de 5 anos, a norma CNR – DT 205/2007 [18] impõe um valor de máximo de $L/250$ (9.6 mm para o caso em estudo) para a combinação de ações quase-permanente. Tendo em conta que a deformação instantânea de 8 mm, determinada experimentalmente, corresponde à sobrecarga $q_k = 2.0 \text{ kN/m}^2$, então para um cenário de ações quase-permanentes $g_k + 0.3 \times q_k$, estima-se uma flecha instantânea de 3.64 mm. Uma estimativa conservativa para a deformação máxima a longo prazo (5 anos) nos painéis sandwich que acautela os efeitos de fluência, pode ser obtida através do método proposto por Garrido *et al.* [19], com o qual se obteve um valor de 9.4 mm, ligeiramente inferior ao limite regulamentar definido em SLS.

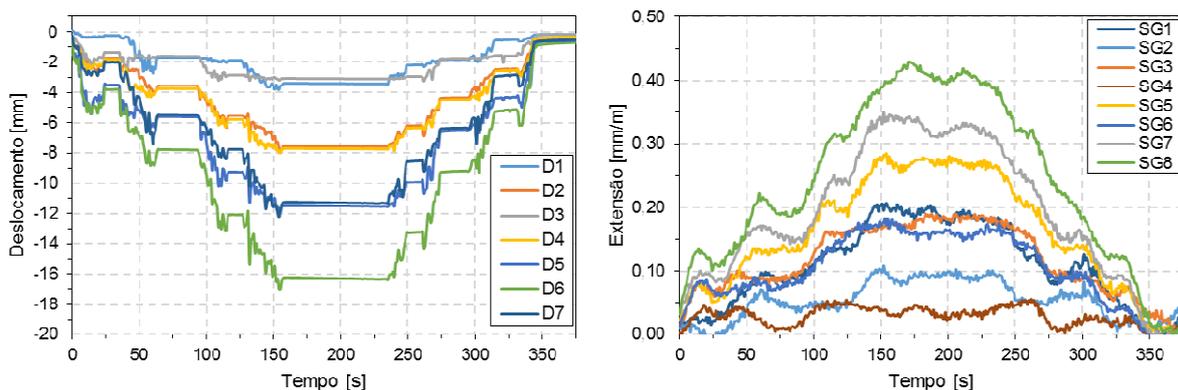


Figura 14. Resultados para o ensaio E2.

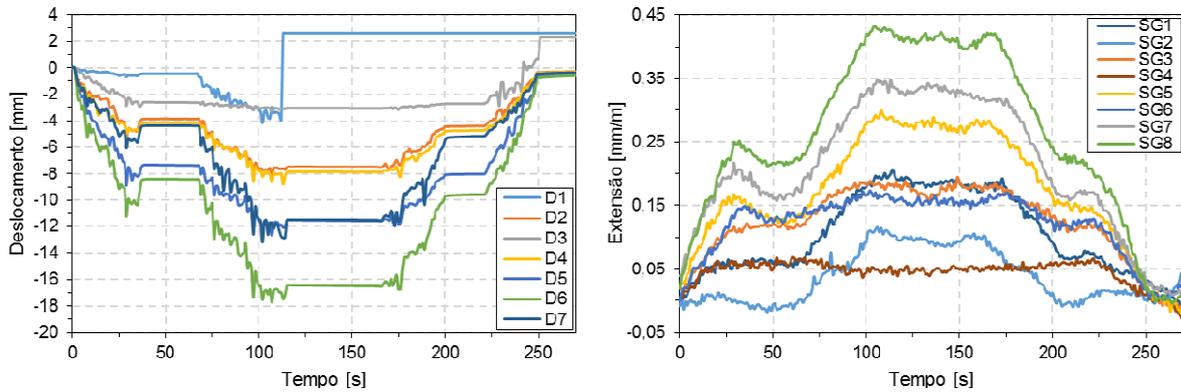


Figura 15. Resultados para o ensaio E3.

Na figura anterior observa-se que o LVDT D1 apresenta uma saturação devido a um contacto com o transdutor, provocado durante o ensaio, levando a que este se deslocasse da sua posição inicial. No entanto, os dados deste transdutor não são condicionantes para o estudo realizado.

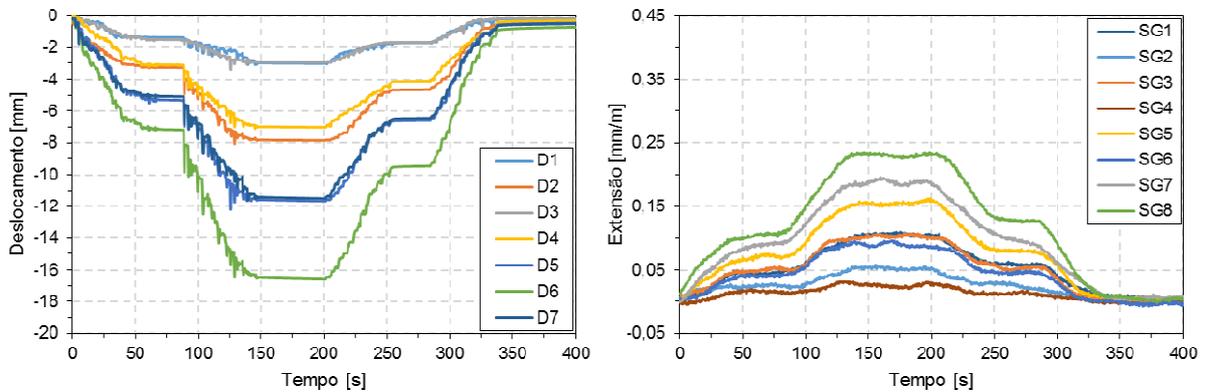


Figura 16. Resultados para o ensaio E4.

4.3 Resultados dos ensaios de vibração ambiental

Para o tratamento de dados relativos aos ensaios de vibração ambiental utilizou-se o método de Identificação Estocástica em Subespaços, com a variante DATA. Registaram-se séries temporais com cerca de duas horas de dados a uma frequência de amostragem de 100 Hz. A Figura 17a e a Figura 17b apresentam os diagramas de estabilização para frequências e amortecimento, respetivamente. O Quadro 5 apresenta o resumo de todos os parâmetros modais identificados.

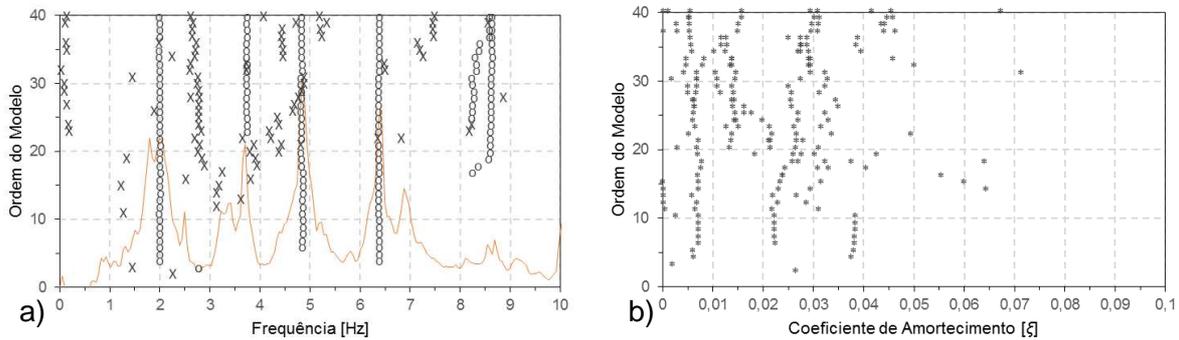


Figura 17. Diagramas de estabilização para frequências a) e amortecimento b).

Quadro 5. Parâmetros modais.

Grau de liberdade	Modo de vibração			
	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
A1	0.46	-0.51	0.92	-0.08
A2	0.20	0.58	0.42	0.34
A3	0.48	-0.10	1.00	0.12
A4	0.15	1.00	0.23	0.55
A5	0.56	0.42	-0.48	-0.05
A6	1.00	-0.10	-0.94	1.00
A7	0.56	0.04	-0.65	0.17
Frequência (Hz)	2.00	3.74	4.84	6.39
Amortecimento (%)	3.36%	0.18%	0.29%	0.53%

Na Figura 19, representam-se os primeiros quatro modos de vibração identificados.

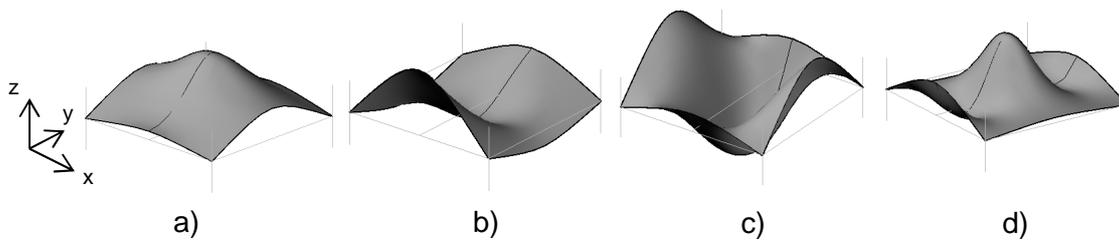


Figura 18. Modos de vibração identificados: (a) Modo 1; (b) Modo 2; (c) Modo 3; (d) Modo 4.

Registaram-se frequências entre 2.00 Hz a 6.39 Hz e amortecimento entre 0.18% a 3.36%. O primeiro e segundo harmónicos da estrutura situam-se dentro do espectro de frequências para as ações pedonais (1.25 Hz a 4.60 Hz). No entanto, esta última conclusão não implica diretamente que a estrutura venha a sofrer problemas de ressonância por efeito de ações pedonais, porque não é claro que a concentração de pessoas possa influenciar a forma como a sollicitação atua sobre a estrutura, para este tipo de habitações de emergência.

5. CONCLUSÕES

Do presente estudo, salientam-se as seguintes conclusões relativas ao comportamento dos painéis sandwich analisados:

1. O comportamento no plano das lâminas de GFRP dos painéis é ligeiramente ortotrópico, sendo o módulo de elasticidade e a tensão de rotura iguais a respetivamente 9.64 GPa e 117.67 MPa para a direção longitudinal e 10.02 GPa e 112.25 MPa para a direção transversal; o coeficiente de Poisson determinado é próximo de 0.26.
2. O PU revela um comportamento elástico à compressão até uma extensão máxima de 3% e uma tensão de cedência de 0.30 MPa, com um módulo de elasticidade de 9.26 MPa. A partir daquele valor de extensão, o comportamento é marcadamente não linear.
3. O comportamento global dos painéis revelou que a estrutura é mais rígida na direção X, o que conduz a maiores deformações nas vigas que suportam esta direção (cerca de 60% a 70% da carga total); a deformação máxima para a sobrecarga característica foi 16 mm, correspondente a uma deformação máxima relativa nos painéis de cerca de 8 mm.
4. Os painéis sandwich cumprem os requisitos regulamentares em SLS definidos nas recomendações italianas CNR – DT 205/2007, tendo sido estimada uma deformação máxima a longo prazo (5 anos) de 9.4 mm, baseado no método proposto por Garrido *et al.* [19].
5. As frequências de vibração naturais da estrutura ensaiada variam entre 2.00 Hz e 6.39 Hz e os amortecimentos encontram-se entre 0.18% e 3.36%. Constatou-se, também, que os dois primeiros harmónicos da estrutura situam-se dentro do espectro de frequências para as ações pedonais.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é apoiado pela Adi pelo Quadro de Referência Estratégico Nacional (QREN) através do Programa Operacional Fatores de Competividade – COMPETE e fundos nacionais, sob o projeto no. 38967 ClickHouse – Desenvolvimento de um protótipo de habitação de emergência em materiais compósitos. Os autores manifestam também um especial agradecimento ao Eng.º Mário Alvim e ao Eng.º Tomé Santos da empresa Alto – Perfis pultrudidos, Lda pela sua colaboração em todo o projeto.

REFERÊNCIAS

- [1] Thomsen, O. T. et al. - *Sandwich Structures 7: Advancing with Sandwich Structures and Materials: Proceedings of the 7th International Conference on Sandwich Structures, Aalborg University, Aalborg, Denmark, 29-31 August 2005*. Springer, 2006.
- [2] Davies, J. M. - *Lightweight Sandwich Construction*. Wiley, 2008.
- [3] Allen, H. G. - *Analysis and design of structural sandwich panels*. Pergamon Press, 1993.

- [4] Correia, J. R. et al. - GFRP sandwich panels with PU foam and PP honeycomb cores for civil engineering structural applications. *International Journal of Structural Integrity*. Vol. 3. n.º 2 (2012). p. 127-147.
- [5] Petras, A. - *Design of Sandwich Structures*. Robinson College, Cambridge: Cambridge University, 1998.
- [6] Bank, L.C. - *Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials*. Wiley, 2006.
- [7] Hollaway, L. - *Polymer Composites for Civil and Structural Engineering*. Springer Netherlands, 2012.
- [8] Frostig, Y. - Buckling of sandwich panels with a flexible core—high-order theory. *International Journal of SOLIDS and STRUCTURES*. Vol. 35. n.º 3 (1998). p. 183-204.
- [9] Frostig, Y. - Behavior of delaminated sandwich beam with transversely flexible core—high order theory. *Composite structures*. Vol. 20. n.º 1 (1992). p. 1-16.
- [10] Barbero, E. J. - *Introduction to Composite Materials Design, Second Edition*. Taylor & Francis, 2010.
- [11] Reddy, J. N. - *Mechanics of laminated composite plates and shells: theory and analysis*. CRC press, 2004.
- [12] Petrone, G. et al. - Modal characterisation of recyclable foam sandwich panels. *Composite Structures*. Vol. 113. n.º 0 (2014). p. 362-368.
- [13] Lameiras, R. et al. - Development of sandwich panels combining fibre reinforced concrete layers and fibre reinforced polymer connectors. Part II: Evaluation of mechanical behaviour. *Composite Structures*. Vol. 105. n.º 0 (2013). p. 460-470.
- [14] Lameiras, R. et al. - Development of sandwich panels combining fibre reinforced concrete layers and fibre reinforced polymer connectors. Part I: Conception and pull-out tests. *Composite Structures*. Vol. 105. n.º 0 (2013). p. 446-459.
- [15] Standardization, International Organization for - ISO 527-4:1997. ISO, 1997.
- [16] ASTM: C365-03. Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores. *ASTM Int. West Conshohocken*. PA. 2004.
- [17] Pan, N. - Analytical Characterization of the Anisotropy and Local Heterogeneity of Short Fiber Composites: Fiber fraction as a variable. *J. Composite Materials*. V.28. p. 1500-1531.
- [18] CNR: DT 205/2007. Guide for the Design and Construction of Structures made of FRP Pultruded Elements. *Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction*. Rome. 2007.
- [19] Garrido M. et al. - Creep behaviour of sandwich panels with rigid polyurethane foam core and glass-fibre reinforced: Experimental tests and analytical modelling. *Journal of Composite Materials*. Vol. 48. p. 2237–2249.