

LAJE SANDWICH EM POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO E ARGAMASSA DE ULTRA ELEVADA DUCTILIDADE PARA A REABILITAÇÃO ESTRUTURAL



Mohammad Mastali*

Aluno de Doutoramento
ISISE, DEC, UMinho
Guimarães, Portugal
muhammad.mastali@gmail.com



Joaquim A. O. Barros

Prof. Catedrático
ISISE, DEC, UMinho
Guimarães, Portugal
barros@civil.uminho.pt



Isabel B. Valente

Profª Auxiliar
ISISE, DEC, UMinho
Guimarães, Portugal
isabelv@civil.uminho.pt

SUMÁRIO

Neste trabalho apresenta-se um novo sistema estrutural em laje sandwich formada por camada inferior de tração e nervuras transversais em material polimérico reforçado com fibra de vidro (GFRP), núcleo em material leve e com propriedades de isolamento térmico, e camada de compressão em argamassa de ultra elevada ductilidade (UDFRM). Esta última aumenta a resistência à encurvadura local das nervuras transversais de GFRP, contribui para a resistência e ductilidade do comportamento estrutural da laje, aumenta a proteção às temperaturas elevadas e permite a instalação na face superior da laje de elementos cerâmicos ou outros materiais convencionais de acabamento. Dado tratar-se de um tipo de laje com peso próprio muito inferior a qualquer outra solução construtiva existente, a sua aplicação é especialmente vocacionada para a reabilitação estrutural de edifícios de cantaria onde se preservam as paredes resistentes e se pretende remodelar as lajes.

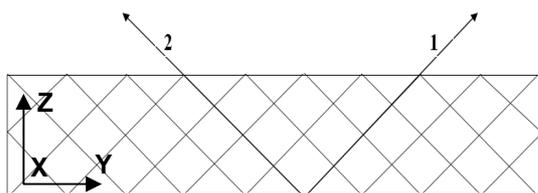
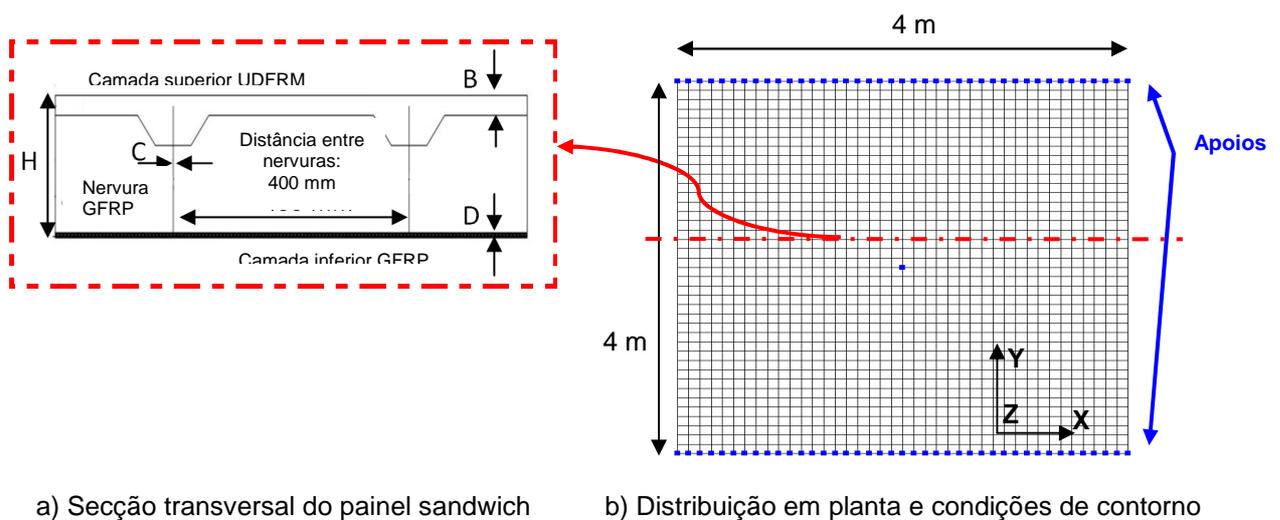
Utilizando um programa de cálculo automático baseado no método dos elementos finitos que dispõe de modelos constitutivos apropriados, foi efetuado um estudo paramétrico de forma a otimizar este sistema estrutural.

Palavras-chave: laje sandwich híbrida, polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP), argamassa de ultra elevada ductilidade (UDFRM)

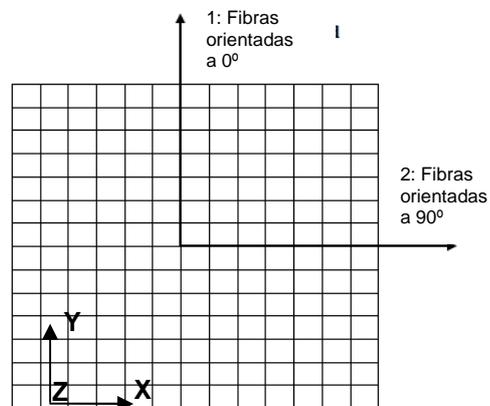
1. INTRODUÇÃO

O painel sandwich híbrido proposto neste trabalho apresenta características inovadoras. É composto por uma camada inferior realizada em laminado reforçado com fibra de vidro (GFRP) e uma camada superior realizada com argamassa de ultra elevada ductilidade (UDFRM). Entre estas duas camadas, existem nervuras de GFRP uniformemente espaçadas que estabelecem a ligação entre a lâmina inferior de GFRP e a camada superior de UDFRM e também espuma de poliuretano (PUR) que garante o espaçamento entre as camadas extremas (Figura 1.a). A camada superior de argamassa UDFRM tem como finalidade aumentar a resistência e a ductilidade do painel e permitir uma aplicação fácil dos materiais de revestimento. A utilização de UDFRM na camada superior de compressão irá também aumentar a rigidez à flexão, o desempenho termo-acústico e a resistência ao impacto do painel, bem como fornecer proteção extra contra incêndio ao respetivo núcleo.

A secção transversal é apresentada de forma genérica na Figura 1.a.



c) Nervuras: fibras orientadas a $\pm 45^\circ$



d) Camada inferior: fibras orientadas a 0° e 90°

Figura 1. Representação esquemática dos elementos que compõem laje sandwich proposta

Pretende-se utilizar uma abordagem numérica para avaliar o comportamento de painéis híbridos sandwich GFRP-UDFRM. Numa primeira fase é realizado um estudo paramétrico em lajes com funcionamento unidirecional submetidas a flexão. Pretende-se selecionar geometrias otimizadas para o uso em provetes à escala real e características adequadas dos materiais. Adicionalmente, o estudo paramétrico avalia os efeitos de cada parâmetro avaliado no comportamento global da laje. Na segunda etapa do estudo, são desenvolvidos modelos FEM onde se consideram os modos de rotura expectáveis, as relações entre carga aplicada e deformação ao longo da viga e a fendilhação da camada superior de argamassa.

2. MODELO NUMÉRICO

Foi desenvolvido um estudo numérico baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF) para otimizar a geometria do painel e avaliar o efeito de cada um dos parâmetros sobre o comportamento do protótipo. Este estudo foi realizado com base no software de análise estrutural FEMIX, um programa MEF desenvolvido por Azevedo *et al* [1] que é capaz de considerar a não linearidade material e geométrica das estruturas analisadas. A primeira etapa deste estudo foi desenvolvida durante a fase de pré-dimensionamento, a fim de auxiliar o processo de escolha das dimensões mais razoáveis para os componentes da laje, tendo sido considerados aspectos económicos e o bom desempenho estrutural das lajes estudadas. São identificados quatro modos de rotura possíveis: 1) falha na camada de UDFRM devido a valores de compressão ou tração que superem os correspondentes valores limite; 2) rotura nas nervuras de GFRP por tração ou corte; 3) rotura na camada inferior de GFRP devido a valores de tensão de tração que são mais elevados do que a resistência à tração do GFRP utilizado neste elemento; 4) instabilidade lateral nas nervuras de GFRP devido a corte e compressão no plano da nervura.

Foram admitidas duas hipóteses principais na análise paramétrica realizada: 1) nervuras de GFRP parcialmente embebidas na camada de UDFRM e interação total entre os dois materiais nas zonas de contacto; 2) assumindo que não ocorre dano significativo na espuma de enchimento, ignorar a sua presença no modelo numérico e apenas considerar a sua contribuição como elemento que garante o espaçamento entre as camadas de GFRP e UDFRM.

Foram utilizados elementos finitos isoparamétricos de tipo Mindlin shell com 8 nós e integração 2×2 de Gauss Legendre [1]. A Figura 1.b ilustra a disposição dos apoios, que correspondem a restrições na direção vertical (Z), com exceção do ponto intermédio do vão onde é restringida a translação e a rotação nas duas direções horizontais (X e Y). Considera-se que a solução proposta tem potencial para ser utilizada em aplicações reais, pelo que o estudo paramétrico desenvolvido tem por base um modelo com 4 m de desenvolvimento nas duas direções ortogonais da planta, refletindo os vãos correntes que se encontram em muito edifícios existentes.

3. ESTUDO PARAMÉTRICO

3.1 Análise numérica linear

Na 1ª fase do estudo numérico foi desenvolvida uma análise paramétrica, sendo considerado um comportamento linear de todas as componentes da laje e de todos os materiais usados. O modelo foi desenvolvido com o objetivo de pré-dimensionar a laje proposta, sendo avaliada a respetiva altura, as espessuras das várias camadas e componentes e ainda algumas propriedades dos materiais. Foram consideradas variações de espessura nas nervuras de GFRP, na camada inferior de GFRP e na camada superior de UDFRM, de acordo com o especificado na Tabela 1. Os valores de módulo de elasticidade considerados em cada componente são também indicados na Tabela 1. Nesta fase, a contribuição estrutural da camada de espuma de poliuretano é ignorada.

O modelo inicialmente analisado considerou uma laje simplesmente apoiada nos 4 bordos e os materiais com comportamento isotrópico. Foram avaliadas três alturas de laje (H): 162.5 mm, 130 mm e 100 mm (Figure 1.a). A altura da laje é definida como a distância entre as linhas médias da camada inferior (GFRP) e da camada superior (UDFRM). As restantes cargas permanentes e as cargas variáveis aplicadas são respetivamente iguais a 1.0 e 1.5 kN/m², de acordo com a NP EN1991. Os critérios de dimensionamento admitidos são: 1) Deformação máxima em estado limite de utilização igual a $L/250$, tal como definido na NP EN1992-1-1 [2]; 2) Valores de tensão e extensão inferiores aos máximos definidos, para uma combinação de ações com cargas permanentes multiplicadas por 1.35 e sobrecarga multiplicada por 1.5.

Tabela 1. Valores considerados das espessuras e módulo de elasticidade dos materiais

<i>Varição de espessura [mm] (ver Figura 1.a)</i>						
Camada superior - UDFRM	(B)	10	15	20	25	30
Nervuras GFRP	(C)	2	4	6	8	10
Camada inferior GFRP	(D)	2	5	8	---	---
<i>Módulo de elasticidade [GPa]</i>						
Camada superior – UDFRM		10	20	30	40	50
Nervuras GFRP		5	20	35	---	---
Camada inferior GFRP		10	30	50	---	---

Os resultados obtidos mostraram que os valores de deformação e os valores de tensão nas fibras mais esforçadas da secção transversal são reduzidos [3]. Deste modo, as condições de contorno foram alteradas e passou a considerar-se um comportamento unidirecional da laje, tal como representado na Figura 1.b, uma vez que esta hipótese poderá representar a situação real em muitas aplicações correntes. Considera-se também o comportamento ortotrópico nas componentes da laje onde é utilizado GFRP, procurando traduzir mais

aproximadamente o comportamento real destes materiais. Na camada inferior, admite-se a utilização de lâminas de GFRP com fibra orientada a 0° e a 90° e nas nervuras são utilizadas lâminas com fibra maioritariamente orientada a $\pm 45^\circ$. Estas disposições das camadas de fibra de vidro procuram otimizar a eficácia do GFRP tendo em consideração os campos de tensões normais e tangenciais presentes em cada componente estrutural da laje. As propriedades destes dois tipos de GFRP são listadas na Tabela 2, sendo considerados valores médios representativos de módulo de elasticidade, resistência à tração e resistência ao corte nas duas direções principais consideradas.

Tabela 2. Propriedades do GFRP consideradas [4]

Material	E_1 [GPa]	E_2 [GPa]	V_{12}	G_{1-2} [GPa]	Tensão max. a 0° (1) [MPa]	Tensão max. a 90° (2) [MPa]	Tensão max. a 45° (1-2) [MPa]
Nervuras	12.2	12.2	0.53	8	-----	-----	120
Camada inf.	40	8	0.25	4	1000	30	-----

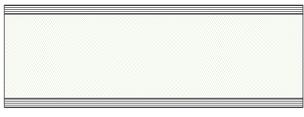
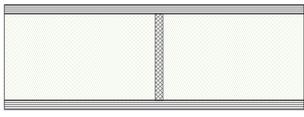
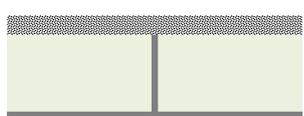
A análise realizada mostrou os seguintes resultados:

1. A alteração das condições de contorno, passando de um funcionamento bidirecional com quarto bordos simplesmente apoiados a um funcionamento unidirecional com dois bordos opostos simplesmente apoiados, e a alteração das propriedades dos materiais, passando de isotrópicos a ortotrópicos, fizeram com que a deformação vertical e as tensões normais máximas aumentassem mais do que o dobro.
2. De modo a limitar a deformação máxima a $L/250 = 16$ mm, a altura da laje deve ser maior ou igual a 100 mm.
3. Em todas as alturas de laje avaliadas, o aumento da espessura da camada de UDFRM conduz a uma redução das deformações verticais e das tensões normais nessa camada, enquanto que as tensões normais na camada inferior de GFRP e as tensões de corte nas nervuras GFRP tendem a aumentar.
4. Aumentar a espessura das nervuras GFRP conduz a menores valores de tensão normal na camada inferior de GFRP e na camada superior de UDFRM.
5. Aumentar a espessura da camada inferior de GFRP faz com que a posição do eixo neutro desça, alterando apenas ligeiramente os valores das tensões de corte nas nervuras das lajes com 162.5 mm e 130 mm de altura.

3.2 Avaliação analítica da eficiência da solução proposta

De modo a avaliar melhor a eficiência da solução híbrida proposta, realizou-se uma comparação com duas soluções alternativas: a solução (1) corresponde a um painel sandwich simples com camadas superior e inferior em GFRP e sem nervuras, e a solução (2) corresponde a um painel sandwich com camadas superior e inferior em GFRP (ambas com igual espessura) e com nervuras também em GFRP, tal como se apresenta na Tabela 3.

Tabela 3. Componentes da seção transversal das soluções alternativas analisadas

Tipo de laje	Secção transversal	Posição da componente	
Painel sandwich simples		Camada superior	GFRP
		Camada intermédia	Espuma de poliuretano
		Camada inferior	GFRP
Painel sandwich com nervuras		Camada superior	GFRP
		Camada intermédia	Nervura GFRP + Espuma de poliuretano
		Camada inferior	GFRP
Painel sandwich híbrido		Camada superior	UDFRM
		Camada intermédia	Nervura GFRP + Espuma de poliuretano
		Camada inferior	GFRP

A partir dos resultados obtidos no estudo paramétrico referido no item 3.1, foram escolhidas duas soluções de referência para efeitos comparativos, com altura total de 140 mm e 180 mm, cujas dimensões são detalhadas na Tabela 4.

As propriedades mecânicas dos GFRP utilizados foram já referidas na Tabela 1. Para a camada superior UDFRM considerou-se ainda um coeficiente de Poisson (ν) igual a 0.15, um módulo de elasticidade igual a 18.4 GPa e uma resistência à compressão igual a 31.6 MPa. Estes valores foram determinados com base em ensaios experimentais realizados com o intuito de definir e avaliar as propriedades da argamassa que será posteriormente utilizada em protótipos para ensaios experimentais [3].

Foram estabelecidas as equações analíticas (1) e (2) para calcular a deformação máxima sofrida pelas lajes, tal como proposto por Johnson *et al* [4]. Estas equações consideram o efeito de deformação por flexão e por corte. Na equação (1), considera-se que o esforço de corte é transferido pelo material da camada de enchimento (espuma de poliuretano) e na equação (2) admite-se que o esforço de corte é transmitido pelas nervuras.

Tabela 4. Dimensões dos componentes das lajes analisadas [8]

	Espessura [mm]	Largura ou Altura [mm]	Espessura [mm]	Largura ou Altura [mm]	
		Laje 1		Laje 2	
Camada inf. GFRP	3	800	5	800	
Nervura GFRP	6	157	4	115	
Camada de enchimento	157 ou 174	800	115 ou 130	800	
Camada sup. UDFRM	20	800	20	800	

Diagrama de uma laje (Laje 1) com camadas: Camada Superior UDFRM: 20 mm, Camada Inferior GFRP: 3 mm, Nervura GFRP: 6 mm. Altura Total: 180 mm.

Diagrama de uma laje (Laje 2) com camadas: Camada Superior UDFRM: 20 mm, Camada Inferior GFRP: 5 mm, Nervura GFRP: 4 mm. Altura Total: 140 mm.

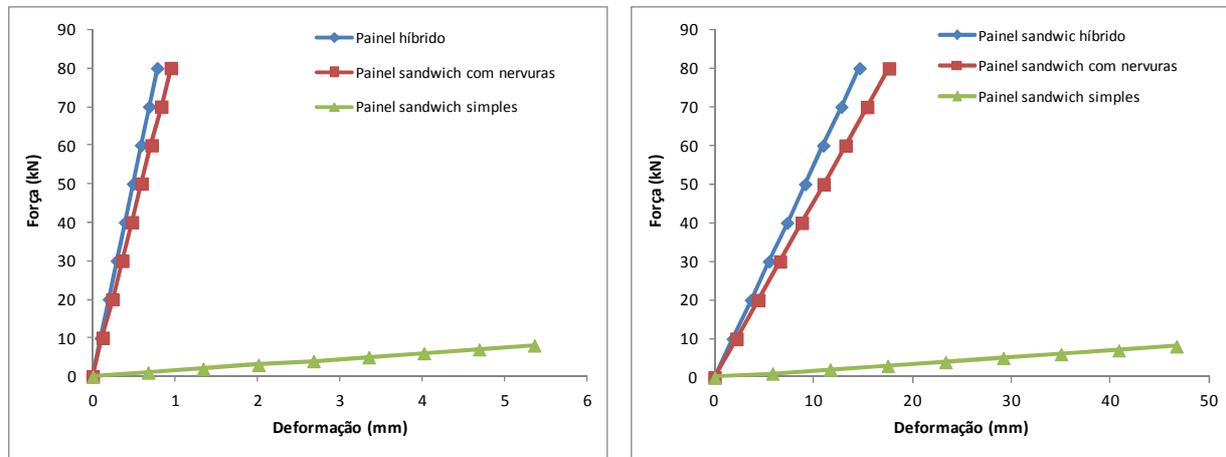
Nas equações (1) e (2), P é a carga aplicada nas lajes, L é o vão, EI é a rigidez à flexão calculada com base numa secção homogeneizada (considerando as propriedades específicas de cada material utilizado) e G é o módulo de distorção do GFRP aplicado nas nervuras. Os valores de rigidez calculados com base nas equações (1) e (2) são detalhados na Tabela 5, enquanto na Figura 2 representa-se a relação entre carga aplicada e deformação correspondente para as soluções analisadas.

$$\Delta = \frac{(PL^3)}{(48EI)_{Total}} + \left(\frac{PL}{4KGA}\right)_{Núcleo} \quad (1)$$

$$\Delta = \frac{(PL^3)}{(48EI)_{Total}} + \left(\frac{PL}{4KGA}\right)_{Nervura} \quad (2)$$

Tabela 5. Rigidez à flexão e ao corte calculada com base nas equações (1) e (2)

	Painel sandwich híbrido		Painel sandwich com nervuras		Painel sandwich simples	
	Laje 1	Laje 2	Laje 1	Laje 2	Laje 1	Laje 2
EI [kN.m ²]	2760.0	1660.0	1320.0	1300.0	64.0	60.0
GA [KN]	15360.0	9280.0	15360.0	9280.0	204.8	185.6



a)

b)

Figura 2. Relação entre força aplicada e deformação máxima: a) Laje 1; b) Laje 2

De acordo com os resultados representados na Figura 2.a., a Laje 1 apresenta uma rigidez que é 21.6% superior à do correspondente painel sandwich com nervuras. Por sua vez, a Laje 1 é 69 vezes mais rígida que o correspondente painel sandwich simples.

No caso da Laje 2, esta apresenta uma rigidez que é 20.4% superior à do correspondente painel sandwich com nervuras. A Laje 2 é 32 vezes mais rígida que o correspondente painel sandwich simples. Os resultados apresentados revelam que a solução proposta de painéis sandwich híbridos conduz a um aumento significativo da rigidez e da capacidade resistente das lajes, para a mesma altura total da secção transversal.

3.3 Análise não linear

Numa segunda fase do estudo paramétrico, considerou-se importante avaliar os efeitos da fendilhação e da resistência à tração da argamassa de elevada ductilidade utilizada na camada superior, passando a incluir modelos constitutivos capazes de traduzir o comportamento deste material. Esta análise assume grande importância, uma vez que se pretende que a espessura da camada de argamassa seja tão reduzida quanto possível, de modo utilizar uma quantidade mínima deste tipo de material. Os materiais GFRP utilizados apresentam um comportamento aproximadamente linear até à rotura, enquanto a argamassa (UDFRM) utilizada na camada superior da laje apresenta um comportamento não linear em compressão e em tração. Deste modo, é considerado um modelo de fendilhação distribuída multidirecional fixa para simular a iniciação e a propagação das fendas na camada superior. Após a abertura da 1ª fenda, a argamassa apresenta um comportamento pseudo-plástico com endurecimento.

O modelo de multi-fendas fixas foi utilizado para simular o comportamento não linear da camada UDFRM, sendo a esta camada modelada como elemento de casca de Reissner-Mindlin com diversas camadas de forma a captar a iniciação e propagação de fendas. Quando o comportamento do material é considerado não linear, a matriz constitutiva depende dos níveis de tensão impostos. Neste caso, para obter a solução das equações não-lineares, é utilizado o método incremental e iterativo de Newton-Raphson.

Todos os parâmetros considerados na análise numérica foram quantificados com base em ensaios experimentais realizados para determinar as propriedades da argamassa reforçada com fibras que se pretende utilizar [3]. Os correspondentes valores são apresentados na Tabela 6. A Tabela 7 lista todas as variantes consideradas para altura total da laje e espessura das nervuras, da camada inferior e da camada superior. Cada conjunto de alturas corresponde a uma coluna e o significado de cada variável é definido na Figura 1.a.

Tabela 6. Propriedades da argamassa UDFRM [3]

<i>Parâmetros do material UDFRM considerados</i>	
Coeficiente de Poisson	$\nu_c = 0.15$
Módulo de elasticidade	$E_c = 18420 \text{ MPa}$
Resistência à compressão	$f_c = 24 \text{ MPa}$
Nº máximo de fendas num ponto de integração	2
Parâmetros do diagrama tri-linear do betão à tração	$f_{ct} = 2.57 \text{ MPa}$; $G_f = 4.18 \text{ N/mm}$ $\zeta_1 = 0.24$; $\alpha_1 = 1.43$; $\zeta_2 = 0.6$; $\alpha_2 = 0.58$
Parâmetro definidor da energia de fratura em modo I para o segundo conjunto de fendas	$P_1 = 2$
Parâmetro de retenção de tensões de corte	<i>Exponential</i> ($P_2 = 2$)
Largura de banda de fendilhação, l_{cr}	<i>Raíz quadrada da área no ponto de integração</i> ($\sqrt{A_i}$)
Ângulo limite para abertura de nova fenda	$\alpha_{th} = 30^\circ$

Tal como anteriormente, um dos critérios de rotura admitidos é o valor de deformação máxima, calculado de acordo com a norma NP EN 1992-1-1 [2], neste caso igual a 16 mm, considerando o efeito das cargas permanentes e o efeito da sobrecarga. O multiplicador α permite avaliar o incremento que a sobrecarga pode sofrer em relação ao valor mínimo admissível em pavimentos até ser atingida uma deformação máxima de 16 mm, tal como mostra a equação (3). A capacidade de carga da laje é calculada considerando o máximo valor de α que provoca o valor de deformação limite, se este for o critério condicionante.

Tabela 7. Dimensões consideradas nos provetes testados numericamente

Refª	Espessura				Refª	Espessura				Refª	Espessura			
	H	B	C	D		H	B	C	D		H	B	C	D
	[mm]	[mm]				[mm]	[mm]				[mm]	[mm]		
SGH 1	162.5	10	2	5	SMH 1	130	10	2	5	SZH 1	100	10	2	5
SGH 2	162.5	15	2	5	SMH 2	130	15	2	5	SZH 2	100	15	2	5
SGH 3	162.5	20	2	5	SMH 3	130	20	2	5	SZH 3	100	20	2	5
SGH 4	162.5	25	2	5	SMH 4	130	25	2	5	SZH 4	100	25	2	5
SGH 5	162.5	30	2	5	SMH 5	130	30	2	5	SZH 5	100	30	2	5
SGR 2	162.5	30	4	5	SMR 2	130	30	4	5	SZR 2	100	30	4	5
SGR 3	162.5	30	6	5	SMR 3	130	30	6	5	SZR 3	100	30	6	5
SGR 4	162.5	30	8	5	SMR 4	130	30	8	5	SZR 4	100	30	8	5
SGR 5	162.5	30	10	5	SMR 5	130	30	10	5	SZR 5	100	30	10	5
SGS 1	162.5	30	2	2	SMS 1	130	30	2	2	SZS 1	100	30	2	2
SGS 3	162.5	30	2	8	SMS 3	130	30	2	8	SZS 3	100	30	2	8

A largura da abertura de fendas também foi considerada como um critério de rotura. O seu valor foi numericamente calculado, multiplicando a largura de banda de fendilhação, l_{cr} , apresentada na Tabela 6 pelo valor da extensão normal na fenda. De acordo com a NP EN 1992-1-1, o valor máximo da abertura de fenda para uma combinação quase-permanente de ações é igual a 0.3 mm [2].

Sobrecarga aplicada até ser atingida a deformação limite de $16 \text{ mm} = \alpha \times 1.5 \text{ [kN/m}^2\text{]}$ (3)

Da Figura 3 à Figura 6, são apresentados resultados obtidos com os modelos numéricos desenvolvidos. As figuras procuram mostrar a influência dos vários parâmetros analisados, quando se consideram as seguintes situações de carregamento (para além das cargas permanentes): (A) aplicação de sobrecarga regulamentar de valor igual a 1.5 kN/m^2 e (B) aplicação de sobrecarga correspondente ao valor de deformação máxima admissível de 16 mm. As análises efetuadas permitiram observar os seguintes resultados:

1. O aumento da espessura da camada de argamassa UDFRM, corresponde a uma diminuição das tensões de compressão nessa mesma camada e a uma diminuição na deformação global da laje, enquanto que o valor das tensões de tração na camada inferior de GFRP e nas nervuras tendem a aumentar. Verifica-se um aumento da capacidade de carga da laje.
2. De acordo com os resultados obtidos, uma camada de argamassa com espessura de apenas 10 mm não é adequada devido a excessiva fendilhação.
3. O aumento da espessura da camada de argamassa UDFRM conduz a uma redução na máxima largura de fendas, enquanto o aumento de espessura na camada inferior ou nas nervuras conduz a um aumento desse parâmetro.

4. Um aumento da camada inferior de GFRP de 2 mm para 8 mm corresponde a uma diminuição de aproximadamente 50% no valor da deformação global máxima da laje. O aumento da espessura da camada inferior conduz também a uma diminuição dos valores de tensão nos componentes de GFRP (camada inferior e nervuras).
5. Aumentar a altura da laje leva a vários resultados importantes: a) o fator α aumenta significativamente, o que corresponde a um aumento da capacidade de carga da laje; b) verifica-se um aumento das tensões em todas as componentes devido ao aumento das cargas aplicadas na laje; c) o nº de fendas e a largura máxima de fendas é maior (ver Figuras 3 a 6).
6. A espessura das nervuras GFRP é o parâmetro com mais influência na capacidade de carga da laje híbrida. A espessura da camada inferior GFRP e a espessura da camada superior UDFRM são os seguintes parâmetros com maior relevância.

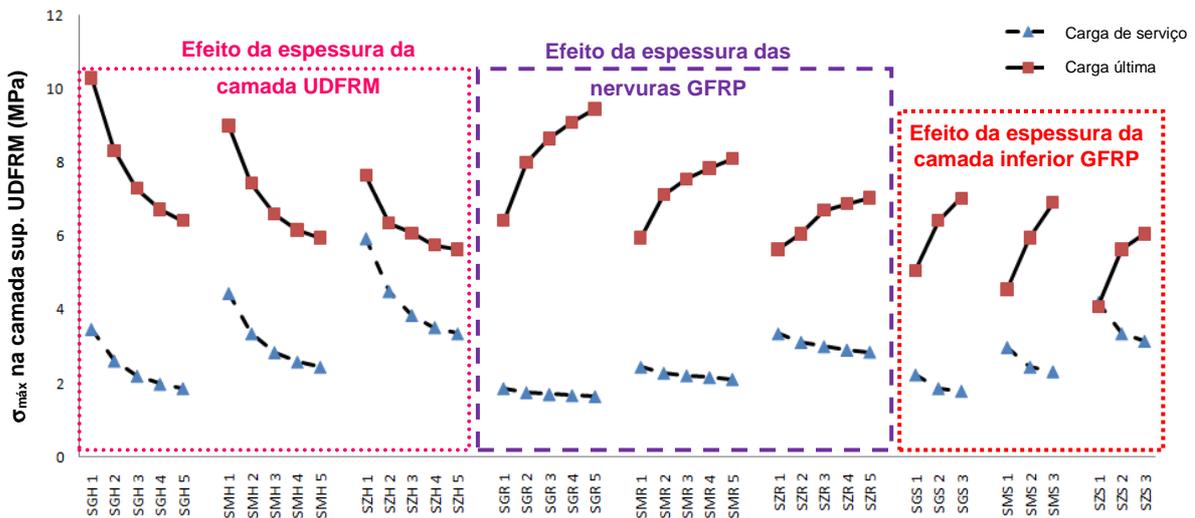


Figura 3. Tensão de compressão máxima na camada superior UDFRM

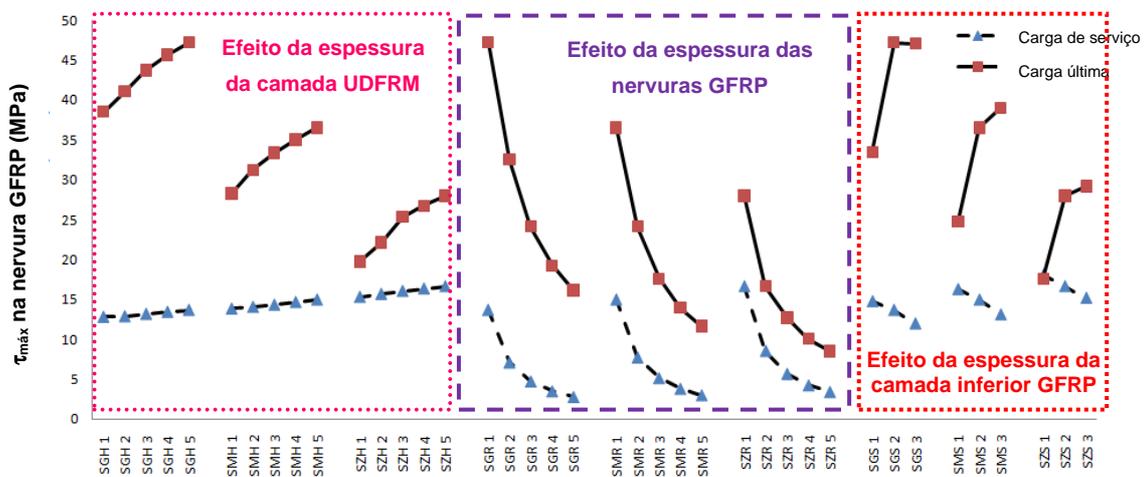


Figura 4. Tensão de corte máxima nas nervuras GFRP

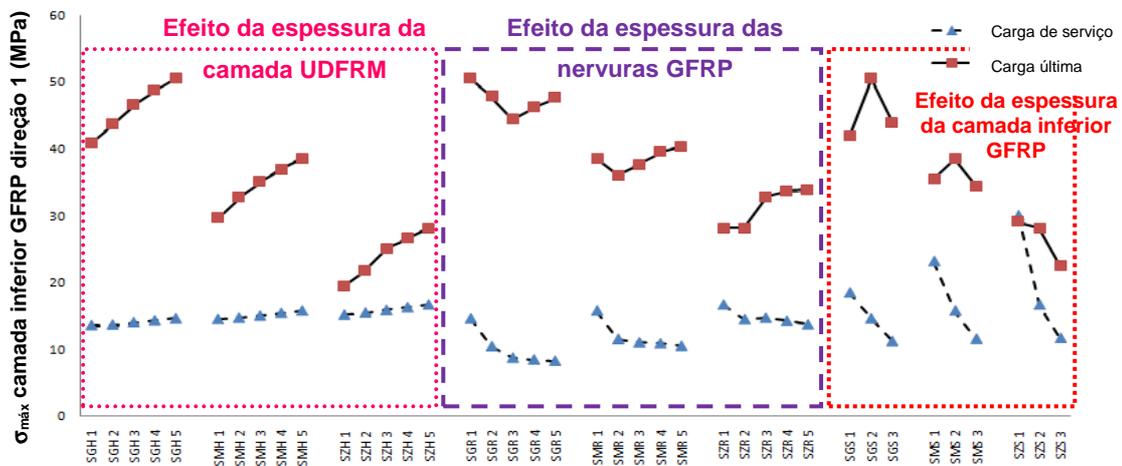


Figura 5. Tensão de tração máxima nas camada inferior GFRP, na direção 1 (σ_1)

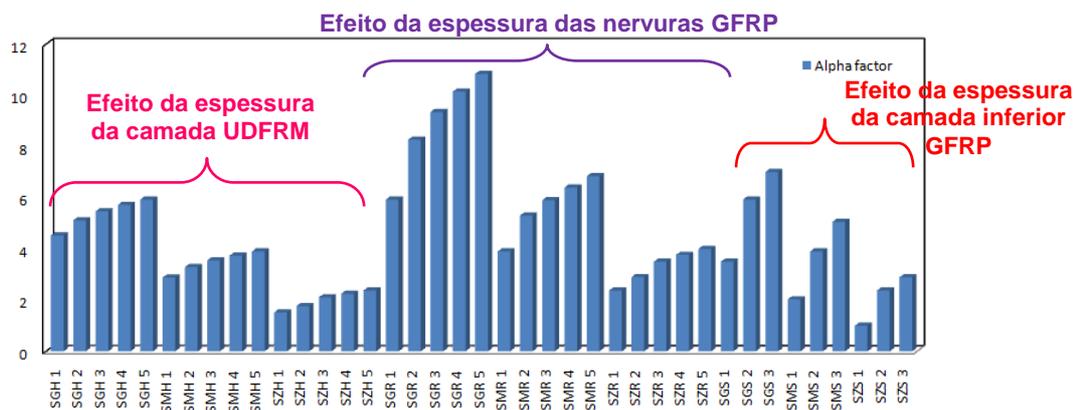


Figura 6. Variação do fator α

Tal como já foi mencionado, um dos modos de rotura possíveis resulta da possibilidade de ocorrer instabilidade local nas nervuras de GFRP. As equações (4) a (10) são consideradas no cálculo das tensões de compressão nas nervuras, uma vez que não é possível a simulação direta de fenómenos de instabilidade do tipo referido no software FEMIX [3].

$$\sigma = \frac{\pi^2}{t_R d_R^2} (13.9 \sqrt{D_{R1} D_{R2}} + 11.1 D_{R12} + 22.2 D_{RS}) \quad (4)$$

$$D_{R1} = \frac{E_{R1} t_R^3}{12 (1 - \nu_{R1} \nu_{R2})} \quad (5)$$

$$D_{R2} = \frac{E_{R2} t_R^3}{12 (1 - \nu_{R1} \nu_{R2})} \quad (6)$$

$$D_{R12} = \nu_{R1} D_{R2} = \nu_{R2} D_{R1} \quad , \quad \nu_{R2} = \frac{E_1}{E_2} \nu_{R1} \quad (7)$$

$$D_{RS} = \frac{G_{R12} t^3_R}{12} \quad (8)$$

$$\sigma_{critical} = \frac{\sigma}{\gamma_m} \quad (9)$$

$$\gamma_m = \gamma_{m1} * \gamma_{m2} * \gamma_{m3} \quad (10)$$

Nas equações (4) a (10), os parâmetros E_{R1} e E_{R2} correspondem aos módulos de elasticidade nas direções 1 e 2 das nervuras, tal como representado na Figura 1.c, d_R é a altura total da nervura, G_{R12} é o módulo de distorção na nervura (na Tabela 2, este valor é igual a 8 GPa), e γ_m é um coeficiente de segurança considerado igual a 3.16 [6]. As tensões de corte no plano plano das nervuras são calculadas com as equações (11) a (14).

$$\tau = \frac{4K_{12} \sqrt[4]{D_{R1} D_{R2}^3}}{t_R d_R^2} \quad (11)$$

$$K_{12} = 8.125 + 5.045 K, \text{ for } K \leq 1 \quad (12)$$

$$K = \frac{(2D_{RS} + D_{R12})}{\sqrt{D_{R1} D_{R2}}} \quad (13)$$

$$\tau_{Critical} = \frac{\tau}{\gamma_m} \quad (14)$$

De modo a seleccionar as dimensões mais adequadas para as lajes híbridas propostas, foram consideradas as seguintes condições limite: deformação máxima admissível igual a 16 mm, não ocorrência de instabilidade lateral nas nervuras de GFRP devido à combinação de elevadas tensões de corte e compressão, tensões máximas de compressão ou tração nas várias componentes da secção transversal com valor superior à capacidade resistente do respetivo material. Tendo em consideração os limites enumerados, é definida a solução economicamente viável com base na maximização do valor de α .

De acordo com os valores das propriedades do GFRP listados na Tabela 2, a tensão máxima admissível na direção 2 da camada inferior (orientação a 90°) é muito inferior ao valor da tensão máxima admissível na direção 1 (orientação a 0°) dessa mesma camada. Os resultados obtidos mostram que as tensões de tração na direção 2 da camada inferior são bastante inferiores às tensões de tração que se mobilizam na direção 1 e que os valores obtidos são sempre inferiores às tensões máximas admissíveis definidas na Tabela 2, o que atesta a adequação dos materiais propostos.

Com base nos resultados obtidos, são propostos 7 novos protótipos ótimos, cujos resultados são listados na Tabela 8, onde H , B , C e D são dimensões representada na Figura 1.a; $Força^*$ corresponde ao somatório das reações nos apoios; $\sigma_{GFRP,90^\circ}$ e $\sigma_{GFRP,0^\circ}$ são tensões de tração na camada inferior de GFRP nas direções (1) e (2), respetivamente; $\tau_{nervuras}$ e

$\sigma_{\text{comp,nervuras}}$ são, repetivamente, tensões máximas de corte e de compressão nas nervuras; σ_{UDFRM} é a tensão máxima de compressão na camada de argamassa.

Analisando os resultados obtidos nos modelos testados, verifica-se também que os valores de tensão de compressão na camada superior de argamassa nunca excedem o valor da resistência à compressão deste material. Analisando ainda os resultados obtidos em função do valor do parâmetro α (Figura 6), observa-se que as lajes com 100 mm de altura tendem a apresentar um comportamento menos adequado, encontrando-se exemplos em que o valor de α é inferior a 1 ou próximo deste limite [8]. Devido aos elevados valores de deformação referidos, os protótipos com 100 mm de altura deixaram de ser considerados.

A ocorrência de instabilidade local nas nervuras GFRP é avaliada através de uma comparação entre os valores de tensão de compressão e tensão de corte calculados com os correspondentes valores admissíveis máximos.

Tabela 8. Resultados obtidos nas soluções otimizadas de laje híbrida

Ref ^a		SGO 1	SGO 2	SGO 3	SMO 1	SMO 2	SMO 3	SMO 4
H	[mm]	162.5	162.5	162.5	130	130	130	130
$B/C/D$	[mm]	30/6/5	30/6/3	20/6/3	20/6/5	20/6/3	30/6/2	30/6/3
Máxima largura de fenda	[mm]	0.0023	-----	0.0036	0.0038	-----	-----	-----
Força*	[kN]	249.46	181.34	165.65	149.05	103.69	167.23	122.13
$\sigma_{\text{GFRP},90^\circ}$	[MPa]	13.74	11.06	10.90	10.71	8.46	11.50	9.49
$\sigma_{\text{GFRP},0^\circ}$	[MPa]	44.50	46.88	44.20	35.15	35.56	37.74	40.38
τ_{nervuras}	[MPa]	24.12	17.67	16.20	15.73	11.12	17.61	13.30
$\sigma_{\text{comp,nervuras}}$	[MPa]	16.20	38.38	35.11	17.67	22.65	10.20	26.64
$\sigma_{\text{comp,UDFRM}}$	[MPa]	8.65	6.98	7.87	8.50	6.37	7.55	6.18
Deformada	[mm]	3.24	4.27	4.66	4.87	6.44	4.74	6.13
α		9.35	6.54	5.88	5.34	3.46	7.38	4.13
Tensão crítica de corte nas nervuras	[MPa]	32.10	32.10	32.10	50.16	50.16	50.16	50.16
nas nervuras compressão	[MPa]	181.78	181.78	181.78	284.04	284.04	284.04	284.04
Status	√	√	√	√	√	√	√	√

4. CONCLUSÕES

A solução de laje híbrida proposta mostrou elevada capacidade de carga e comportamento adequado, pelo que se considera que a sua utilização na reabilitação de pisos de edifícios é viável. A análise realizada permitiu perceber que a espessura da camada de argamassa de elevada ductilidade (UDFRM) é o componente da laje cuja variação tem menos impacto na capacidade de carga da laje híbrida e que a forma mais eficiente de incrementar o fator α é aumentar a espessura das nervuras GFRP. Verificou-se também que o aumento da altura total da laje incrementa a sua capacidade de carga, mas torna-a mais vulnerável a efeitos de instabilidade nas nervuras. Apesar disso, foi possível encontrar dimensões ótimas da laje onde a ocorrência de instabilidade nas nervuras não se verifica.

AGRADECIMENTOS

O estudo aqui apresentado foi desenvolvido no âmbito do projeto PTDC/ECM/113041/2009 “RehabGFRP - Rehabilitation of Building Floors with Lightweight High Performance GFRP Sandwich Panels”, financiado pela FCT - Fundação para a Ciência e Tecnologia. Os autores reconhecem e agradecem o apoio financeiro concedido a este projeto e à unidade de investigação ISISE que permitiram a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] Azevedo, A.F.M.; Barros, J.A.O.; Sena-Cruz, J.M.; Gouveia, A.V., "Software no ensino e no projecto de estruturas", *III Congresso Luso Moçambicano de Engenharia*, p. 81-92, 19-21 Agosto 2003. <http://hdl.handle.net/1822/13106>
- [2] NP EN 1992-1-1:2010 “Eurocódigo 2 - Projeto de estruturas de betão. Parte 1.1: Regras gerais e regras para edifícios, IPQ 2010.
- [3] Mastali M., Barros J.A.O., Valente I.B., “Design process of hybrid GFRP-ECC sandwich panel”, 2013, Report N.º 13-DEC/E-02, University of Minho, Portugal.
- [4] C. M. Johnson, T. S. Mohamed, S. H. Rizkalla, 2007, “Behavior of three-dimensionally woven glass fiber reinforced polymeric bridge deck”, *Composites Research Journal*, Vol. 1, Issue 2, pp: 27–42.
- [5] Selcom multiaxial technology company, Biaxial products. <http://www.multiaxialfabricselcom.com/en/Products/>
- [6] Eurocomp, “Structural Design of Polymer Composites,” Eurocomp Design Code and Handbook (J. Clarke, ed.), 1996, E&FN Spon, London.