а

Reforço de lajes fungiformes com armadura transversal pós-instalada usando diferentes técnicas de ancoragem

Strengthened flat slabs by transverse reinforcement post-installed using different anchorage approaches

Micael Manuel Gonçalves Inácio António Manuel Pinho Ramos Duarte Miguel Viúla Faria

Resumo

Este artigo descreve o trabalho experimental desenvolvido para estudar uma técnica de reforço ao punçoamento de lajes fungiformes através da introdução de nova armadura transversal pós-instalada. Foram ensaiados 8 modelos de laje fungiforme reforçados com a introdução de armadura vertical pós-instalada, usando diferentes técnicas de ancoragem: de grandes dimensões na superfície da laje, de pequenas dimensões na superfície da laje e de pequenas dimensões embebidas no betão de recobrimento da armadura longitudinal da laje. Foi também ensaiado um modelo de referência, não reforçado. É analisado o comportamento deste tipo de solução estrutural, nomeadamente: a deformação dos modelos, a extensão da armadura longitudinal, a carga e modo de rotura e a evolução da força nas armaduras de reforço. As cargas de rotura experimentais e os modos de rotura são comparados com os valores previstos pelo EC2, ACI 318-11 e MC2010.

Abstract

The present work reports the experimental research carried out to study a strengthening method for flat slabs under punching by introduction of new transverse reinforcement. Eight specimens were strengthened with the introduction of prestressed vertical steel bolts, using different anchorage approaches: large anchorage on surface, small anchorage on surface and small embedded anchorage. An unstrengthened reference specimen was also tested.

The models displacements, longitudinal reinforcement strain, load and mode of failure and evolution of force in bolts are analyzed. The experimental punching loads and failure modes are compared with the provisions of EC2, ACI 318-11 and MC2010.

Palavras-chave: Punçoamento / Laje fungiforme / Ancoragem / Reforço / Betão armado

Keywords: Punching / Flat slab / Anchorage / Strengthening / Reinforced concrete

Micael Manuel Gonçalves Inácio

UNIC, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa Lisboa, Portugal mmgi@fct.unl.pt

António Manuel Pinho Ramos

Professor Auxiliar Ceris, ICIST, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa Lisboa, Portugal ampr@fct.unl.pt

Duarte Miguel Viúla Faria

Engenheiro Civil Muttoni & Fernández, Ingénieurs Conseils Lausanne, Suíça duamvf@gmail.com

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

INÁCIO, Micael [*et al.*] – Reforço de lajes fungiformes com armadura transversal pós-instalada usando diferentes técnicas de ancoragem. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 3. ISSN 2183-8488. (março 2017) 63-74.

1 Introdução

Atualmente, as estruturas em laje fungiforme são correntemente utilizadas em edifícios para os mais variados fins. O uso deste tipo de estruturas permite, de facto, grande versatilidade no que diz respeito à divisão dos espaços e maior facilidade na execução das instalações técnicas. Além disso, esta técnica apresenta ainda as vantagens da simplicidade, economia e rapidez de execução.

O comportamento estrutural das lajes fungiformes é bastante complexo, particularmente nas zonas de ligação pilar-laje, devido à concentração de esforços de flexão e corte. A resistência ao punçoamento é na maioria das vezes o fator preponderante no dimensionamento da espessura deste tipo de lajes, optando-se por vezes pela utilização de capitéis.

Com a generalização das estruturas em laje fungiforme, verificam-se frequentemente problemas estruturais, normalmente relacionados com a resistência ao punçoamento. Para solucionar tais problemas de resistência ao punçoamento podem ser aplicadas diferentes técnicas de reforço. Ramos [1], [2], Duarte [3], [4] e Luís [5], [6] estudaram o reforço de lajes fungiformes ao punçoamento com a introdução de parafusos transversais à laje, em torno do pilar. No entanto, nesses trabalhos foram usadas chapas de ancoragem de grandes dimensões à superfície da laje, obrigando, numa situação real de reforço, à realização de trabalhos adicionais com o objetivo de dissimular as chapas de ancoragem. Este trabalho pretende estudar o efeito do posicionamento e da área da ancoragem na técnica de reforço de lajes fungiforme através da introdução de parafusos.

2 Programa experimental

2.1 Descrição dos modelos e sistema de ensaio

Os modelos ensaiados são painéis quadrados de laje de betão armado com 1800 mm de lado e 120 mm de espessura. O modelo não reforçado designa-se de *R*, enquanto aos modelos reforçados foi atribuída uma designação em função do diâmetro do parafuso de reforço e da dimensão e posicionamento da ancoragem, de acordo com o Quadro I.

A armadura longitudinal foi dimensionada para que os modelos atinjam rotura por punçoamento. A armadura longitudinal superior era composta por uma malha quadrada de 24 varões ϕ 10 em cada direção igualmente distribuídos, com exceção dos modelos M6SE e M8SE que tinham 22 varões em cada direção. A armadura longitudinal inferior foi uma malha quadrada ϕ 6//0,20 m em todos os modelos. O recobrimento da armadura inferior e superior é aproximadamente de 10 mm e 20 mm, respetivamente. Durante o fabrico dos modelos de laje fungiforme foi medida a altura útil (*d*) da armadura longitudinal de cada modelo, apresentando-se o seu valor médio no Quadro I, assim como a percentagem geométrica de armadura longitudinal (ρ).

Os modelos foram sujeitos a um carregamento monotónico centrado até à rotura através de um macaco hidráulico posicionado debaixo da laje, usando uma placa de aço com dimensões de $200 \times 200 \text{ mm}^2$ que simula um pilar no centro dos modelos. A

espessura da placa de aço que simula o pilar é de 50 mm, possuindo assim rigidez suficiente para manter a superfície de contacto plana ao longo do ensaio. Os ensaios foram realizados com controlo por forca.

Quadro I Designação e características dos modelos

Modelo	d (mm)	ρ (%)	Parafusos de reforço	Ancoragem
R	87,1	1,20	-	-
M10	83,5	1,25	M10	Chapa de grandes dimensões
M8a	93,5	1,12	M8*	Chapa de grandes dimensões
M8	90,3	1,16	M8	Chapa de grandes dimensões
M8S	94,1	1,11	M8	Chapa de pequenas dimensões, à superfície
M8SE	90,9	1,04	M8	Chapa de pequenas dimensões, embutida
M6	89,5	1,17	M6	Chapa de grandes dimensões
M6S	91,1	1,15	M6	Chapa de pequenas dimensões, à superfície
M6SE	91,2	1,04	M6	Chapa de pequenas dimensões, embutida

* Neste modelo os parafusos não foram pré-esforçados mas apenas ajustados.

O sistema de ensaio utilizado é apresentado na Figura 1, sendo constituído por quatro perfis metálicos RHS 150 \times 150 \times 10 mm³, sob os quais são colocadas oito placas de aço com dimensões de 100 \times 100 \times 20 mm³, que apoiam na face superior do modelo. Através de quatro cordões de aço de alta resistência com diâmetro de 15,24 mm, ancorados por cabeças de ancoragem sobre os perfis metálicos e à laje de reação do laboratório, são garantidas as condições de fronteira do modelo.

O carregamento dos modelos reforçados foi feito em duas fases: primeiro foram carregados até aproximadamente 60% da carga de rotura do modelo não reforçado (R), sendo de seguida descarregados e reforçados (fase de fendilhação). A técnica de reforço usada consiste em executar furos na laje em torno do pilar e introduzir parafusos que são pré-esforçados de seguida. Após reforço, as lajes são carregadas até à rotura (fase de carregamento até à rotura).

No reforço dos modelos referidos neste trabalho foram usados dezasseis parafusos dispostos em duas camadas em torno do pilar, conforme apresentado na Figura 2a). A primeira linha de parafusos foi colocada a cerca de 0,5d da face da área carregada e a segunda linha a cerca de 0,75d da primeira. A Figura 2b) apresenta em detalhe a zona de ancoragem nos modelos com as ancoragens embutidas. A geometria dos parafusos de reforço e das chapas de ancoragem usadas são apresentadas na Figura 3.

A força inicial nos parafusos foi aplicada através de uma chave dinamométrica. No modelo M8a os parafusos foram apenas ajustados com o objetivo de estudar o efeito do pré-esforço nesta técnica de reforço.



Figura 1 Geometria dos modelos e sistema de ensaio



Figura 2 a) Posicionamento da armadura de reforço e b) detalhe da ancoragem embutida





2.2 Propriedades dos materiais

Para caracterizar o betão usado nos modelos foram ensaiados seis cubos de 150 × 150 × 150 mm³ (f_{ccm}) à compressão no mesmo dia do ensaio da laje respetiva. Os resultados são apresentados no Quadro II, juntamente com a resistência à compressão em cilindros

 (f_{cm}) calculada como 0,8 f_{ccm} . São ainda apresentados os valores da tensão de cedência do aço (f_{y}) , da tensão limite de proporcionalidade a 0,2% do aço $(f_{0,2})$, do módulo de elasticidade (E_w) e da tensão de rotura do aço da armadura longitudinal (f_{r}) .

Quadro II Propriedades dos materiais usados

	Modelo	R	M10	M8a	M8	M8S	M8SE	M6	M6S	M6SE
	f _{ccm} (MPa)	49,1	52,4	59,9	59,6	48,4	33,5	59,6	45,4	33,5
	$f_{_{cm}}$ (MPa)	39,3	41,9	47,9	47,7	38,7	26,8	47,7	36,3	26,8
a	$f_{y}/f_{0,2}$ (MPa)		58	36		5	23	586	5	23
Ø	f_t (MPa)		69	96		6	518	696	6	518
<i>(</i> X 1)	$f_{y}/f_{0,2}$ (MPa)		4	67		5	29	467	5	29
Ø	f_t (MPa)		59	97		6	53	597	6	53
NAC	f _{0,2} (МРа)	-	-	-	-	-	-	421	530	530
1416	<i>E_w</i> (GPa)	-	-	-	-	-	-	197	195	195
M8	f _{0,2} (МРа)	-	-	523	523	587	587	-	-	-
	<i>E_w</i> (GPa)	-	-	200	200	217	217	-	-	-
N 41	<i>f</i> _{0,2} (MPa)	-	534	-	-	-	-	-	-	-
M10	E (GPa)	_	223	_	_	_	_	_	_	_

2.3 Monitorização

Os deslocamentos verticais na face superior dos modelos foram medidos ao longo dos ensaios em cinco pontos através de defletómetros elétricos. Em cada modelo foram instrumentados três varões da armadura longitudinal superior com a colagem em cada um deles de dois extensómetros elétricos diametralmente opostos. O posicionamento dos defletómetros e dos varões instrumentados é apresentado na Figura 4.



Figura 4 Posicionamento dos defletómetros (à esquerda) e dos extensómetros (à direita)

A carga vertical aplicada aos modelos foi quantificada através de quatro células de carga, uma por cada cordão de pré-esforço que fixa o modelo de ensaio à laje de reação do laboratório (Figura 1). A evolução da força instalada nos parafusos de reforço foi medida usando extensómetros elétricos colados a meio do comprimento dos parafusos. Em oito dos dezasseis parafusos de reforço foi colado

um par de extensómetros (Figura 5) e essa informação foi usada para calcular a evolução da força nos parafusos durante o decorrer dos ensaios.



Figura 5 Parafuso de reforço instrumentado com extensómetro elétrico

3 Análise dos resultados experimentais

3.1 Capacidade de carga e modo de rotura

Os valores das cargas de rotura obtidas experimentalmente são apresentados no Quadro III. Para fazer a análise do aumento da capacidade de carga dos modelos reforçados de forma a ter em conta as variações da altura útil, da percentagem de armadura e da resistência à compressão do betão, as cargas experimentais foram divididas pelo valor obtido com a expressão do EC2 [7] que permite calcular o valor resistente ao punçoamento centrado sem armaduras específicas, usando os valores médios para a resistência à compressão do betão e desprezando a limitação do fator k. As relações obtidas foram posteriormente divididas pelo valor obtido para a laje de referência (R), permitindo assim considerar apenas o efeito do reforço na análise da resistência ao punçoamento das lajes reforçadas. Os resultados obtidos para a capacidade de carga adimensionalizada de cada um dos modelos são apresentados na Figura 6. Os resultados dos ensaios experimentais mostraram que a técnica de reforço usada foi eficiente, levando ao incremento médio da capacidade de carga de 54% no modelo M10, de 21% nos modelos M8 e de 15% nos modelos M6.

Os resultados obtidos com o uso de ancoragens de pequenas dimensões em vez de ancoragens de grandes dimensões não mostraram uma tendência clara. Nos modelos com parafusos de reforço M8 foi observado um pequeno decréscimo da capacidade de carga, enquanto nos modelos reforçados com parafusos M6 a capacidade de carga foi ligeiramente incrementada. Além disso, verifica-se uma ligeira redução da eficiência da técnica de reforço utilizada quando se usam ancoragens embebidas no betão de recobrimento da armadura longitudinal.

Nos ensaios foram observados dois modos de rotura: a superfície de rotura atravessa o reforço, designado neste documento como rotura pelo interior; a superfície de rotura desenvolve-se por fora da armadura de reforço, designado neste documento como rotura pelo exterior. Os modelos M6, M8a, M6S, M6SE e M8SE apresentaram o primeiro modo de rotura enquanto os modelos M10 e M8 apresentaram rotura pelo exterior do reforço. É importante não esquecer que nos modelo M8 e M10, que apresentaram rotura pelo exterior do reforço, se observou a cedência das armaduras longitudinais. No modelo M8S foi observado um modo de rotura misto, ou seja, de um lado a superfície de rotura atravessou a armadura de reforço enquanto no lado oposto desenvolveu-se pelo exterior.

Quadro III Cargas de rotura obtidas (V_{exp}) e cargas teóricas de rotura por flexão (V_{fiex}) (kN)

	R	M10	M8a	M8	M8S	M8SE	M6	M6S	M6SE
V _{exp}	269,0	405,9	366,3	381,0	352,3	273,0	331,0	328,6	273,8
V_{flex}	310,7	298,0	340,2	327,9	378,1	321,0	324,7	364,0	323,1



Figura 6 Capacidade de carga adimensionalizada

O Quadro III apresenta os valores calculados do V_{flex} (carga de rotura à flexão) para os vários modelos, utilizando o método das linhas de rotura. Pela análise dos resultados, pode ser concluído que nos modelos M10, M8a e M8 a capacidade de carga foi influenciada pela sua resistência à flexão. Para as cargas correspondentes a V_{flex} , as forças instaladas nos parafusos dos modelos referidos não tinham ainda atingido a sua capacidade máxima, conseguindo ainda aumentar a carga vertical aplicada ao modelo. Este comportamento está relacionado com o incremento da deformação da laje quando esta atinge a sua capacidade de carga por flexão, levando à solicitação dos parafusos de reforço, incrementando a capacidade de carga da laje. Além disso, os modelos M10, M8a e M8 apresentaram igualmente um decréscimo repentino da carga na rotura, o que leva a concluir que estes modelos tiveram um modo de rotura misto punçoamento/flexão.

A Figura 7 apresenta a vista da superfície de rotura em corte dos modelos ensaiados. O posicionamento dos parafusos de reforço é representado através de linhas verticais vermelhas e a área carregada está representada no centro da face inferior. Após o corte dos modelos ensaiados foi possível medir a inclinação da superfície de rotura. No Quadro IV são apresentados apenas os valores médios medidos em ambas as direções, uma vez que a inclinação da superfície de rotura é semelhante em todo o seu contorno.



Figura 7 Vista em corte do modelo M8SE após rotura, em ambas as direções

Quadro IV Inclinação média da superifície de rotura (°)

R	M10	M8a	M8	M8S	M8SE	M6	M6S	M6SE
31	44	42	45	40	44	40	36	42

Pelos resultados obtidos, verifica-se que a introdução da armadura de reforço levou ao incremento da inclinação da superfície de rotura. De facto, nos modelos reforçados a inclinação média da superfície de rotura foi de 42º enquanto no modelo de referência, não reforçado, foi de 31º.

3.2 Deslocamentos verticais

Nesta secção são apresentados alguns gráficos que foram elaborados com o objetivo de simplificar a análise de resultados. Para cada modelo reforçado ensaiado foi elaborado um gráfico com a evolução dos deslocamentos ao longo das duas fases de carregamento a que foram sujeitos, fase de fendilhação e fase de carregamento até à rotura (Figura 8). No modelo de referência apenas existiu a fase de carregamento até ocorrer a rotura da laje.

Os gráficos apresentados na Figura 8 dizem respeito ao deslocamento vertical às distâncias de 300 e 750 mm do centro da laje, e os valores foram obtidos pela média dos defletómetros colocados nos pontos referidos.

Em todos os modelos o aparecimento de fendas ocorre para valores de carga aplicada entre 40 kN e 80 kN. Pela análise da evolução dos descolamentos, verifica-se que após a primeira fase de carregamento, todos os modelos apresentaram uma deformação residual de cerca 1 mm, com exceção do modelo M6 onde a deformação residual medida foi de cerca 0,3 mm.



Figura 8 Evolução dos deslocamentos ao longo do carregamento

Depois da fase de reforço, a rigidez dos modelos mantém-se aproximadamente inalterada em relação à primeira fase de carregamento (fase de fendilhação), levando a concluir que o tipo de reforço estudado não altera significativamente a rigidez das lajes. No entanto, realça-se o facto de todos os modelos reforçados apresentarem um aumento significativo de ductilidade, uma vez que estes permitiram alcançar maiores deformações na rotura do que o modelo de referência. Note-se ainda que os modelos em que foram usadas chapas de ancoragem de pequenas dimensões embebidas no betão de recobrimento da armadura longitudinal apresentam maiores deformações que os restantes, para o mesmo nível de

Figura 9 Evolução da extensão nas armaduras longitudinais com a força aplicada

carga aplicada. Este comportamento pode estar relacionado com o facto de o betão usado nestes dois modelos ser de classe resistente inferior.

3.3 Extensões nas armaduras longitudinais

Nesta secção é apresentada e analisada a evolução das extensões na armadura longitudinal superior dos modelos ensaiados. Conforme referido na secção 2.3, procedeu-se à instrumentação com extensómetros elétricos de três varões da armadura longitudinal superior com maior altura útil (direção y). Em cada varão instrumentado foram colocados dois extensómetros em posição diametralmente oposta, sendo a distância entre varões instrumentados de aproximadamente 150 mm, conforme apresentado na Figura 9.

A evolução da extensão da armadura longitudinal com o aumento da carga vertical aplicada é apresentada através de gráficos. Para cada modelo ensaiado, apresenta-se na Figura 9 um gráfico com a evolução no decurso do ensaio, dos valores médios dos extensómetros de cada varão instrumentado. Durante os ensaios experimentais, os extensómetros colados nos varões do modelo M8a e em alguns varões de outros modelos foram danificados, não sendo por isso apresentados os resultados. Com a exceção dos gráficos relativos ao modelo de referência (R), são apresentados no mesmo gráfico a evolução das extensões nos varões na fase de fendilhação e na fase de carregamento até à rotura.

De acordo com as propriedades da armadura longitudinal apresentadas no Quadro II e considerando o valor do módulo de elasticidade de 200 GPa, a extensão de cedência dos varões da armadura longitudinal é 2,3‰ e 2,7‰, nos modelos R, M10, M8a, M8, M6 e M8S, M8SE, M6S, M6SE, respetivamente.

A partir dos resultados apresentados na Figura 9 é possível observar que todos os varões instrumentados entraram em cedência nos modelos M8 e M10. Todavia, é importante relembrar que os varões instrumentados estão próximos da zona carregada e são os que têm maior altura útil. No modelo M8S, o varão instrumentado mais próximo da zona carregada entrou em cedência, enquanto os restantes varões instrumentados apresentam um decréscimo abrupto da extensão. Uma possível causa para este comportamento poderá estar relacionada com o desenvolvimento de fendas próximo dos pontos monitorizados, diminuindo as extensões nos instrumentados.

3.4 Força nos parafusos de reforço

Em cada um dos modelos reforçados foi monitorizada a evolução da força em metade dos parafusos usados para reforço, através da colagem de um par de extensómetros em cada parafuso monitorizado.

O Quadro V apresenta a força inicial nos parafusos, a força nos parafusos no momento da rotura e a variação da força nos parafusos de reforço durante o ensaio. A Figura 10 apresenta a evolução da média das forças nos parafusos de reforço interiores e exteriores ao longo do ensaio.

A força instalada nos parafusos permanece aproximadamente constante até a carga vertical aplicada atingir cerca de 70% a 95% da carga de rotura, indicando o início da abertura de fendas de corte atravessando a espessura da laje. Este comportamento valida o facto de as lajes poderem ser reforçadas quando estão descarregadas, como descrito na secção 2.1, uma vez que os parafusos de reforço apenas foram mobilizados para um nível de carregamento próximo da rotura, até porque a primeira fendilhação é por flexão e só posteriormente por corte.

De uma forma geral, o incremento da força nos parafusos interiores é superior ao dos parafusos exteriores. O incremento da força nos parafusos dos modelos em que as chapas de aço foram embebidas no betão de recobrimento da armadura longitudinal foi inferior ao dos modelos com ancoragens colocadas à superfície.

Quadro V	Força inicial, força na rotura e variação da força instalada
	(kN)

	Para	fusos inter	iores	Parafusos exteriores			
Modelo –	$F_i^{(a)}$	$F_{f}^{(b)}$	$\Delta F^{(c)}$	F (a)	F _f ^(b)	$\Delta F^{(c)}$	
M10	11,1	19,3	8,2	11,4	18,0	6,6	
M8a	1,2	15,7	14,5	1,3	13,8	12,5	
M8	4,9	14,7	9,8	6,7	11,8	5,1	
M8S	5,5	11,3	5,8	5,6	8,5	2,9	
M8SE	6,0	10,4	4,4	6,0	7,6	1,6	
M6	4,2	5,6	1,4	3,0	5,1	2,1	
M6S	2,7	6,4	3,7	2,8	5,7	2,9	
M6SE	3,2	6,2	3,0	2,3	4,4	2,1	

 $^{(a)}$ F_{i} – força inicial; $^{(b)}$ F_{i} – força na rotura; $^{(c)}$ ΔF – variação da força.

A dimensão da chapa de ancoragem dos parafusos de reforço é um fator importante na eficiência do sistema de reforço, uma vez que tem influência direta no desenvolvimento de forças nos parafusos e consequentemente no comportamento da laje reforçada. A área de ancoragem influencia o desenvolvimento de força nos parafusos, uma vez que a rigidez do sistema de ancoragem poderá ser diminuída pelo esmagamento localizado do betão. Além disso, a existência de uma ancoragem de área insuficiente poderá levar à rotura localizada do betão por esmagamento, o que vai limitar o desenvolvimento de força no parafuso.

Nos modelos ensaiados alguns parafusos entraram em cedência ou atingiram mesmo a rotura. No modelo M10 apenas um parafuso entrou em cedência, no modelo M6 todos os parafusos da camada interior e três da camada exterior romperam, no modelo M8a todos os parafusos romperam com exceção de um da camada interior e dois da camada exterior. Nos modelos M6S e M6SE apenas romperam quatro parafusos da camada exterior e dois da camada interior, respetivamente. Nos modelos M8, M8S e M8SE nenhum parafuso entrou em cedência.

3.5 Comparação dos resultados experimentais com os previstos pelo EC2, ACI e MC2010

Foram calculados os valores da carga de rotura ao punçoamento usando as expressões preconizadas no EC2 [7], ACI 318-11 [8] e MC2010 [9], considerando os valores médios da resistência à compressão do betão e não considerando os coeficientes parciais de segurança. Por motivos de limitação de espaço não são apresentadas as expressões utilizadas, no entanto, mais detalhes podem ser encontrados em Faria [10] e Inácio [11].



Figura 10 Evolução da força média nos parafusos da camada interior e exterior do reforço

Modelo	V _{exp} ⁽¹⁾ (kN)	Código	Modo Rotura ⁽²⁾	V _{flex} ⁽³⁾ (kN)	V _{_Rm} ⁽⁴⁾ (kN)	V _{exp} /V ⁽⁵⁾
		EC2			270,2	1,00
D	260.0	ACI 318-11		210.7	209,2	1,29
K	269,0	MC2010 (II)	_	310,7	241,6	1,11
		MC2010 (III)			254,6	1,06
		EC2	Flexão		333,1	1,36
N/10	105.0	ACI 318-11	Flexão	200.0	315,1	1,36
MIU	405,9	MC2010 (II)	Flexão	298,0	316,1	1,36
		MC2010 (III)	Flexão		329,7	1,36
		EC2	Flexão		373,9	1,08
MOS	266.2	ACI 318-11	Interior	240.2	274,4	1,33
I*I0d	200,2	MC2010 (II)	Flexão	540,2	352,7	1,08
		MC2010 (III)	Flexão		364,4	1,08
		EC2	Flexão		365,3	1,16
M8	201.0	ACI 318-11	Interior	2220	263,2	1,45
	1*10 501,0	MC2010 (II)	Flexão	321,9	341,0	1,16
		MC2010 (III)	Flexão		352,3	1,16
		EC2	Interior		353,6	1,00
мос	352,3	ACI 318-11	Interior	270 1	281,4	1,25
14102		MC2010 (II)	Interior	570,1	350,4	1,01
		MC2010 (III)	Interior		366,3	0,96
		EC2	Interior		294,9	0,93
мосг	272.0	ACI 318-11	Interior	221.0	252,2	1,08
I*IO3E	275,0	MC2010 (II)	Exterior	521,0	272,6	1,00
		MC2010 (III)	Interior		288,5	0,95
		EC2	Interior		305,1	1,08
MG	221.0	ACI 318-11	Interior	2247	186,2	1,78
1410	551,0	MC2010 (II)	Interior	524,1	299,2	1,11
		MC2010 (III)	Interior		314,7	1,05
		EC2	Interior		289,2	1,14
1465	220 6	ACI 318-11	Interior	264.0	192,0	1,71
14102	526,0	MC2010 (II)	Interior	504,0	294,7	1,12
		MC2010 (III)	Interior		308,9	1,06
		EC2	Interior		263,6	1,04
MASE	272.9	ACI 318-11	Interior	3221	177,2	1,55
1103E	213,0	MC2010 (II)	Interior	525,1	262,7	1,04
		MC2010 (III)	Interior		275,1	1,00

Quadro VI Comparação entre as cargas de rotura experimentais e estimadas pelos códigos

⁽¹⁾ carga de rotura experimental; ⁽²⁾ modo de rotura previsto; ⁽³⁾ carga de rotura prevista por flexão; ⁽⁴⁾ carga de rotura prevista por punçoamento ⁽⁵⁾ $V_{min} = min(V_{flex}; V_{sm})$.

O Quadro VI faz a comparação entre as cargas de rotura experimentais e os valores previstos usando EC2 [7], ACI 318-11 [8] e MC2010 [9] para os níveis II e III de aproximação. O Quadro VI mostra também o modo de rotura previsto pelos códigos.

No Quadro VII é apresentado o valor médio e o coeficiente de variação (CoV) para a relação V_{exp}/V_{Rm} para os modelos que tiveram rotura por punçoamento, considerando todos os modelos (à esquerda) e apenas considerando os modelos reforçados (valores à direita). Com a análise dos resultados apresentados nos Quadros VI e VII pode ser observado que o EC2 [7] e o MC2010 [9] no nível III de aproximação preveem valores médios para a resistência ao punçoamento que estão muito próximos dos obtidos experimentalmente, com a relação média V_{exp}/V_{Rm} de 1,03 e 1,01, respetivamente.

Os valores obtidos através das expressões preconizadas pelo ACI 318-11 [8] são um pouco conservativos, com valores da relação V_{exp}/V_{Rm} de 1,44 e 1,47, respetivamente, se todos os modelos forem considerados ou se apenas se considerarem os modelos reforçados. Além disso, pode ser observado que o ACI 318-11 [8] apresenta valores mais elevados para o CoV, quando comparado com os valores calculados usando o EC2 [7] e o MC2010 [9].

Comparando os resultados obtidos para os níveis II e III de aproximação do MC2010 [9], verifica-se que existe pouca diferença entre eles e ambos os níveis de aproximação levam a previsões próximas dos resultados experimentais, para esta série de ensaios laboratoriais. Para os modelos que apresentaram um modo de rotura misto flexão/punçoamento a relação V_{exp}/V_{flex} foi de 1,20 com o CoV de 0,12.

Quadro VII Resumo dos resultados obtidos para a relação V_{evo}/V_{Bm}

	EC2	ACI 318-11	MC2010 (II)	MC2010 (III)
Média	1,03 / 1,04	1,44 / 1,47	1,06 / 1,05	1,01 / 1,00
CoV	0,07 / 0,08	0,19 / 0,20	0,05 / 0,05	0,05 / 0,05

(1) todos os modelos/apenas os modelos reforçados.

4 Conclusões

O presente documento apresenta os resultados de um trabalho experimental levado a cabo para avaliar a capacidade de carga ao punçoamento de lajes fungiformes reforçadas através da introdução de parafusos pré-esforçados pós-instalados.

Nos ensaios experimentais, registou-se um aumento da capacidade de carga dos modelos reforçados, com incrementos de 54%, 21% e 15%, para os modelos reforçados com parafusos M10, M8 e M6, respetivamente. Também a inclinação da superfície de rotura foi superior nos modelos reforçados, com uma inclinação média de 42°, enquanto no modelo de referência esta foi de 31°.

Os valores obtidos nos ensaios foram comparados com os previstos pelas normas. Os resultados mostraram que o EC2 [7] e o MC2010 [9] preveem de forma adequada a capacidade de carga dos modelos ensaiados, enquanto o ACI 318-11 [8] é um pouco conservativo.

Para finalizar, a campanha experimental apresentada neste

documento mostrou que o método utilizado no reforço de lajes fungiformes sujeitas a punçoamento centrado é eficiente. Além disso é um método económico, rápido e fácil de implementar.

Estes ensaios monotónicos são um primeiro passo no estudo deste assunto. Atendendo a que este tipo de estruturas é muito utilizado em Portugal, e que a ação sísmica deverá ser considerada, a presente equipa de investigação levou igualmente a cabo ensaios de punçoamento cíclico com este tipo de solução, tendo sido obtido um bom comportamento estrutural sob ação simultânea de cargas gravíticas e horizontais cíclicas [12].

Referências

- Ramos, A. M. P. et al. Repair and strengthening Methods of Flat Slabs for Punching, International Workshop on Punching Shear Capacity of RC Flat Slabs. Royal Institute of Technology, Department of Structural Engineering, 2000, 9 p.
- [2] Ramos, A. M. Reparação e Reforço de Lajes Fungiformes ao Punçoamento. Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 1995, 141 p.
- [3] Duarte, I. Comportamento ao Punçoamento de Lajes Fungiformes Reforçadas com Parafusos. Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2008, 141 p.
- [4] Duarte, I. et al. Strengthening of Flat Slabs with Transverse Reinforcement. Proceedings of CCC2008 – Challenges of Civil Construction International Conference, 2008, 7 p.
- [5] Luís, M. A. S. Punçoamento cíclico de lajes fungiformes reforçadas com pré-esforço transversal. Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2010, 101 p.
- [6] Luís, M. A. S.; Ramos, A. M. P. Estudo Experimental do Punçoamento Cíclico em Lajes Fungiformes Reforçadas com Pré-Esforço Transversal. BE2008 – Encontro Nacional de Betão Estrutural 2008, 2008, 10 p.
- [7] NP EN 1992-1-1 Eurocódigo 2: Projecto de Estruturas de Betão Parte 1-1: Regras Gerais e Regras para Edifícios, 2010, 259 p.
- [8] ACI Committee 318. 318-11 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. American Concrete Institute, 2011.
- [9] Federation International du Beton. 2010. Model Code 2010, First Complete Draft, fib Bulletins N° 55 and 56.
- [10] Faria, D. et al. Punching of strengthened concrete flat slabs Experimental analysis and comparison with codes. Structural Engineering International, Vol. 22, No. 2, May 2012, pp. 202-214.
- [11] Inácio, M. et al Strengthening of flat slabs with transverse reinforcement by introduction of steel bolts using different anchorage approaches. Engineering Structures 44, 2012, 63–77.
- [12] Almeida, A.; Inácio, M. Punçoamento em Lajes Fungiformes Sujeitas a Ações Cíclicas. Relatório 11 do FLAT – Comportamento de Lajes Fungiformes Sujeitas a Ações Cíclicas e Sísmicas, 2014, 56 p.

Reforço de lajes fungiformes com armadura transversal pós-instalada usando diferentes técnicas de ancoragem Micael Manuel Gonçalves Inácio, António Manuel Pinho Ramos, Duarte Miguel Viúla Faria