Resposta da ligação pilar-laje fungiforme sujeita a ações horizontais cíclicas reforçada com estribos

Behaviour of flat slab-column connections strengthened with stirrups under reversed horizontal cyclic loading

> André Almeida António Ramos Rui Marreiros Válter Lúcio Ricardo Faria

Resumo

Este artigo descreve o trabalho experimental realizado para estudar o comportamento de lajes fungiformes utilizando estribos como armadura específica de punçoamento, sujeitas a cargas verticais e cargas cíclicas horizontais. Foram ensaiadas quatro lajes reforçadas com estribos e os resultados obtidos foram comparados com os de uma laje de referência sem armadura específica de punçoamento. Foram usadas diferentes taxas de armadura de punçoamento e duas configurações com três e cinco perímetros de estribos. Os modelos tinham 4,15 x 1,85 m² e 0,15 m de espessura, ligados a dois meios pilares metálicos. O sistema de ensaio utilizado foi desenvolvido pela equipa de investigação com o objetivo de simular as condições de fronteira de uma laje fungiforme real representada entre meios--vãos no sentido longitudinal e entre pontos de momento nulo no sentido transversal. Os resultados mostram que o uso de estribos é eficiente, aumentando a capacidade de drift e de dissipação de energia.

Abstract

This paper describes the experimental campaign to study the behaviour of reinforced concrete flat slab structures, with steel stirrups as punching shear reinforcement, under combined vertical and horizontal cyclic loading. Four slab specimens with stirrups were tested and the results were compared to a control specimen without shear reinforcement. Different shear reinforcement ratios and two configurations with three and five stirrup layers were used. The slabs were 4.15 x 1.85 m² and 0.15 m thick, connected to two steel half columns. The test setup was developed by the research team with the goal of simulate the boundary conditions of a flat slab, representing the slab between middle spans in one direction and between zero bending moment points in the other direction. Results show that the use of steel stirrups as shear reinforcement is very effective, increasing shear, drift and energy dissipation capacities.

Palavras-chave: Análise experimental / Laje fungiforme / Punçoamento / Ação Keywords: Flat slab / Cyclic horizontal action / Shear reinforcement / Stirrups cíclica / Estribos

André Almeida

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Caparica, Portugal andre.almeida@fct.unl.pt

António Ramos

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Caparica, Portugal ampr@fct.unl.pt

Rui Marreiros

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Caparica, Portugal rpcm@fct.unl.pt

Válter Lúcio

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Caparica, Portugal vigl@fct.unl.pt

Ricardo Faria

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Caparica, Portugal rmm.faria@campus.fct.unl.pt

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.

ALMEIDA, A. [*et al.*] – Resposta da ligação pilar-laje fungiforme sujeita a ações horizontais cíclicas reforçada com estribos. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 9. ISSN 2183-8488. (março 2019) 67-74.

1 Introdução

Ao longo das últimas décadas o uso de estruturas de laje fungiforme vulgarizou-se. As suas vantagens arquitetónicas e económicas fizeram desta solução a escolha preferencial para edifícios comerciais e de habitação. A vantagem da inexistência de vigas acarreta no entanto a possibilidade da ocorrência de rotura por punçoamento. Embora este seja um tema que se encontra bem estudado para o caso das ações monotónicas centradas, o caso do punçoamento sob ações horizontais cíclicas suscita ainda muitas dúvidas na comunidade científica. Diversos autores estudaram este fenómeno contudo, sendo um fenómeno complexo e que envolve um grande número de variáveis, torna-se necessário realizar um grande número de ensaios laboratoriais para compreender os fenómenos envolvidos.

Na maioria dos casos não é económica e logisticamente possível realizar ensaios em edifícios, quer à escala real quer reduzida. A solução mais comum é a realização de modelos reduzidos dimensionados para que sejam representativos da ligação pilar-laje que se pretende estudar. Nos ensaios de lajes ao punçoamento monotónico centrado, a aproximação entre a realidade e o modelo experimental é elevada, mas o mesmo não se verifica nos ensaios que envolvem forças horizontais cíclicas realizados ao longo das últimas décadas, nos quais se fazem simplificações que influenciam significativamente os resultados obtidos.

2 Campanha experimental

2.1 Descrição dos modelos

Os modelos ensaiados foram concebidos de forma a representar uma ligação laje-pilar interior de um edifício comum. Os modelos têm um comprimento longitudinal de 4,15 m, 1,85 m de largura e 0,15 m de espessura.

A percentagem de armadura longitudinal superior calculada para a zona do apoio foi de cerca de 1% e a altura útil de 118 mm. Um resumo das características de cada uma das lajes ensaiadas é mostrado no Quadro 1 e a pormenorização das armaduras é mostrada na Figura 1. Para tornar mais fácil a produção, transporte e manuseamento dos provetes, foi usado um pilar metálico. O comportamento elástico do pilar facilita também a análise dos resultados.

Quadro 1 Características das lajes

Laje	V _{previsto} (kN)	A _{sw} (mm²/perímetro)	Número de perímetros	V _{experimental} (kN)
C-50 STR1	419,8	254,5	3	209,9
C-50 STR2	429,1	628,3	3	215,7
C-50 STR3	405,7	254,5	5	202,3
C-50 STR4	391,8	628,3	5	195,9
C-50	397,9	-	-	203,4

Foram testadas quatro lajes com duas taxas de armadura específica de punçoamento diferentes e com três e cinco perímetros de reforço, de acordo com a Figura 2. O espécime C-50, apresentado em detalhe em Almeida [1] e que não tem armadura específica



Figura 1 Pormenorização da armadura longitudinal e localização dos extensómetros



Figura 2 Pormenorização com a localização dos estribos para os casos com 3 e 5 perímetros

de punçoamento, será usado como comparação para avaliar a *performance* da armadura específica de punçoamento.

equidistantes e mantida constante durante o ensaio por uma bomba hidráulica.

2.2 Sistema de ensaio

O Sistema de ensaio utilizado na campanha experimental foi previamente utilizado pela equipa de investigação e é apresentado nos trabalhos de Almeida [1], Inácio [2] e Gouveia [3]. Este sistema usa mecanismos que asseguram a compatibilidade entre os deslocamentos verticais e rotações entre os bordos opostos da laje, que representam o meio vão da laje protótipo. Este efeito é conseguido recorrendo ao uso de dois mecanismos descritos em Almeida *et al.* (2016). A carga vertical é aplicada em oito pontos

2.3 Materiais

O betão usado no fabrico dos modelos foi produzido numa indústria de prefabricação. A resistência média à compressão em cubos com 150 mm de aresta ($f_{c,cube}$), a resistência média em cilindros com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura (f_c) e a resistência à tração determinada através de ensaios de compressão diametral em provetes cilíndricos ($f_{c,cup}$) com as mesmas dimensões são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 Caracterização do betão

Espécime	f _c (MPa)	f _{c,cube} (MPa)	f _{ct,sp} (MPa)
C-50 STR1	53,1	55,2	3,7
C-50 STR2	52,5	56,2	3,6
C-50 STR3	49,2	47,1	4,2
C-50 STR4	44,4	43,7	3,6
C-50	52,4	48,6	2,9

Todas as armaduras foram caracterizadas por ensaios de tração cujos resultados são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 Caracterização do aço

Diâmetro do elemento [mm]	<i>f_y</i> (MPa)	ε _y (%)
Ø10	523,9	0,26
Ø12	544,9	0,27
Ø4,5	543,3	0,27
Ø6	538,0	0,27
Ø8	533,5	0,27

2.4 Instrumentação dos ensaios

Na superfície superior da laje foram aplicados dezoito defletómetros para medir os deslocamentos verticais ao longo da linha média longitudinal (catorze defletómetros) e transversal (quatro defletómetros). Utilizaram-se ainda dois defletómetros para medir o deslocamento horizontal imposto, um ao nível da laje e outro no topo do pilar. Quatro varões da armadura superior longitudinal quer do lado sul, quer do lado norte do pilar foram instrumentados recorrendo a dezasseis extensómetros, como se mostra na Figura 1. Estes resultados não serão apresentados por limitações de espaço. Alguns estribos foram também instrumentados de acordo com a Figura 2.

A medição da força horizontal no topo do pilar superior foi feita através de uma célula de carga localizada no atuador mecânico e a força vertical (gravítica) aplicada através de quatro macacos hidráulicos foi monitorizada por quatro células de carga, uma para cada macaco.

2.5 Protocolo de ensaio

No protocolo utilizado nos ensaios cíclicos, a carga gravítica foi mantida constante seguindo-se a imposição de deslocamentos horizontais cíclicos, como mostra a Figura 3. A velocidade de aplicação da carga gravítica foi de 30 kN/min. A velocidade de aplicação dos deslocamentos horizontais impostos foi de 8 mm/min durante os ciclos de *drift* até 3,5% e 8 mm/min nos ciclos sequentes. A cada modelo foi aplicada como carga gravítica 50% da carga de rotura prevista, a qual já incluía o peso próprio da laje e o peso do sistema de ensaio que totalizava aproximadamente 39,4 kN (ver Quadro 1).



Figura 3 Protocolo de aplicação da carga cíclica

3 Resultados experimentais

Todas as lajes ensaiadas apresentaram rotura por punçoamento, exceto a laje C-50 STR4 que formou uma rótula na ligação pilar-laje. Após aplicação da carga vertical, todos os espécimes apresentavam fendilhação semelhante na face superior, na zona da ligação ao pilar.

Após inspeção visual, os modelos mostram diferentes tipos de rotura. Os espécimes com três perímetros de estribos apresentaram rotura por fora da área reforçada com estribos. A laje C-50 STR3 mostra uma rotura por punçoamento no interior da zona com armadura de punçoamento. A laje C-50 STR4 formou uma rótula na ligação pilarlaje por degradação do betão devido à ação cíclica.

3.1 Comportamento histerético

Os comportamentos histeréticos encontram-se representados na Figura 4. Comparativamente à laje de referência, os espécimes reforçados com armadura específica de punçoamento mostram um aumento na capacidade de *drift* (cerca de 150%) e na força horizontal.

As lajes C-50 STR1 e C-50 STR2 mostram um comportamento muito semelhante, o que é corroborado pela rotura observada, também semelhante (punçoamento por fora do reforço específico). A laje C-50 STR3 mostra um incremento de *performance* quando comparado com os modelos de três perímetros, mostrado pelo maior número de ciclos obtidos, no entanto, este modelo não se destaca dos restantes já referidos do ponto de vista da dissipação de energia. A laje C-50 STR4 apresenta um comportamento em tudo semelhante ao obtido pela laje C-50 STR3 durante os ciclos em comum. Uma vez ultrapassado esse patamar, devido à maior eficiência da armadura transversal específica, que evitou a rotura por punçoamento, foi atingido um patamar de *drift* superior, e uma maior capacidade de dissipar energia devido à perda de rigidez nos ciclos superiores contrariamente à rotura frágil observada nos outros espécimes.

O coeficiente de amortecimento viscoso calculado de acordo com Hose e Seible [4], mostrado na Figura 5, assim como a área dos



Figura 4 Gráficos histeréticos

ciclos histeréticos mostram que independentemente da armadura de punçoamento, estes elementos estruturais não têm uma grande capacidade de dissipação de energia, no entanto, o uso de estribos, por aumentar o número de ciclos pré-rotura, contribui para o aumento da energia total dissipada. A maior dissipação de energia está associada à perda de rigidez observada a cada primeiro ciclo de cada patamar de *drift*.



Figura 5 Coeficiente de amortecimento viscoso

3.2 Extensões nos estribos

A Figura 6 mostra a evolução das extensões nos estribos instrumentados para os vários patamares de drift. Nas lajes C-50 STR1 e C-50 STR2 observaram-se extensões mais elevadas no perímetro intermédio, o que sugere o início da formação do cone de punçoamento. O surgimento desta fenda foi controlado de forma mais eficiente no caso em que foi usada uma maior taxa de armadura de punçoamento. Observou-se cedência de alguns estribos na laje C-50 STR1 o que sugere que, apesar de se ter verificado uma rotura por fora da área reforçada, a rotura por dentro da zona com estribos estava iminente. O espécime C-50 STR3 mostra a ocorrência de dois picos nas extensões do reforço específico de punçoamento no primeiro e no terceiro perímetro a contar do pilar. Este resultado sugere que, caso não estivessem presentes os dois últimos perímetros, a rotura teria acontecido por fora da zona reforcada, como se confirmou no caso da laje C-50 STR1. O corte e posterior demolição local da laje revelou que vários estribos do primeiro perímetro atingiram a rotura. A laje C-50 STR4, devido à maior taxa de armadura dos estribos, não apresentou rotura por punçoamento. A análise das extensões nos estribos sugere que a rotura se restringiu à vizinhança próxima do pilar, pois apenas o primeiro perímetro mostra um pico nas extensões. Este indício foi verificado por inspeção visual, observando-se uma zona degradada junto ao pilar, onde, devido à degradação dos materiais, se formou uma rótula, resultado da ação cíclica.



Figura 6 Extensões na armadura específica de punçoamento



4 Conclusões

Este artigo apresenta o trabalho experimental realizado para estudar o comportamento de lajes fungiformes, com armadura específica de punçoamento, quando sujeitas à ação conjunta de carga gravítica e ações horizontais cíclicas. As principais conclusões deste trabalho são:

- Os espécimes reforçados com armadura específica de punçoamento tiveram um comportamento muito superior ao obtido na laje sem estribos, C-50. Atingiram *drifts* superiores (de 150% a 300%), maiores forças horizontais, maior ductilidade e consequentemente maior capacidade de dissipação de energia.
- 2. Ambas as lajes com apenas três perímetros de estribos apresentaram rotura por fora da zona reforçada, no entanto, no espécime com 5 perímetros e com menor taxa de armadura específica de punçoamento, a rotura por dentro esteve na iminência de ocorrer, o que explica a semelhança nos comportamentos das lajes C-50 STR1, C-50 STR2 e C-50 STR3.
- Nos espécimes reforçados com cinco perímetros de estribos foi evitada a rotura por fora da área reforçada, tendo esta ocorrido por rotura dos estribos num caso e por formação de uma rótula plástica junto ao pilar no outro caso.
- A combinação de cinco perímetros com a maior taxa de armadura específica (espécime C-50 STR4) evitou a rotura por punçoamento, resultando em maiores *drifts* e maior dissipação de energia.
- As extensões e a rotura de alguns estribos mostram que quando bem detalhados e executados, estes são eficientes mesmo em lajes pouco espessas.

Agradecimentos

Este trabalho recebeu apoio da Fundação para a Ciência e a Tecnologia - Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior através da bolsa SFRH/BD/119772/2016.

Referências

- Almeida, A. *et al.* (2016) "Punching behaviour of RC flat slabs under reversed horizontal cyclic loading", *Engineering Structures*, *117*. doi: 10.1016/j.engstruct.2016.03.007.
- [2] Inácio, M. M. G. (2016) Comportamento ao Punçoamento de Lajes Fungiformes em Betão de Elevada Resistência, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, 2016.
- [3] Gouveia, N. D.; Faria, D. M. V.; Ramos, A. P. (2017) "Assessment of SFRC flat slab punching behaviour – part II: reversed horizontal cyclic loading", *Magazine of Concrete Research*, 0(0), pp. 1–17. doi: 10.1680/ jmacr.17.00344.

- [4] Hose, Y. D.; Seible, F. (2000) "Performance Evaluation Database for Concrete Bridge Components and Systems under Simulated Seismic Loads", *EERI Earthquake Spectra*. San Diego.
- [5] CEN (2010) Eurocode 2: Design of concrete structures EN 1992-1-1, NP EN 1992-1-1.
- [6] Fib (2011) Model Code 2010. doi: 10.1002/9783433604090.
- [7] Hanson, N. W.; Hanson, J. M. (1968) "Shear and Moment Transfer Between Concrete Slabs and Columns", *Journal of the Portland Cement Association*, 10(1), pp. 2–16.
- [8] Hawkins, N. M.; Mitchell, D.; Sheu, M. S. (1974) Seismic Resistance of Concrete Slab to Column and Wall Connections. Washington.
- [9] Marreiros, R. (2014) "Precast Concrete Wall-Foundation Connection - Development of a seismic dissipative connection". Universidade Nova de Lisboa.
- [10] Megally, S.; Ghali, A. (2000) "Seismic behavior of edge column-slab connections with stud shear reinforcement", ACI Structural Journal, 97(1), pp. 53–60.
- [11] Ramos, A. et al. (2017) "Punching of flat slabs under reversed horizontal cyclic loading", ACI Special Publication, 315, pp. 253–272.
- [12] Rizk, E.; Marzouk, H. (2013) "Minimum shear reinforcement for thick plates and two-way slabs", *Engineering Structures*. Elsevier Ltd, 46, pp. 1–13. doi: 10.1016/j.engstruct.2012.07.006.
- [13] Robertson, I. N. et al. (1998) "Seismic performance of flat-slab shear reinforcement", in 12WCEE2000, pp. 1–11.
- [14] Robertson, I. N.; Durrani, A. (1991) "Gravity Load Effect on Seismic Behavior of Exterior Slab-Column Connections", ACI Structural Journal, 88, pp. 255–267.
- [15] Robertson, I. N.; Durrani, A. (1992) "Gravity Load Effect on Seismic Behavior of Interior Slab-Column Connections", ACI Structural Journal, 89, pp. 37–45.
- [16] Ruiz, M. F.; Muttoni, A. (2009) "Applications of critical shear crack theory to punching of reinforced concrete slabs with transverse reinforcement", *ACI Structural Journal*, 106(4), pp. 485–494. doi: 10.14359/56614.
- [17] Silva Mamede, N.F.; Pinho Ramos, A.; Faria, D.M.V (2013) "Experimental and parametric 3D nonlinear finite element analysis on punching of flat slabs with orthogonal reinforcement", *Engineering Structures*, 48, pp. 442–457. doi: 10.1016/j.engstruct.2012.09.035.
- [18] Song, J. K. et al. (2012) "Effective punching shear and moment capacity of flat plate-column connection with shear reinforcements for lateral loading", *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 6(1), pp. 19–29. doi: 10.1007/s40069-012-0002-3.
- [19] Symonds, D. W.; Mitchell, D.; Hawkins, N. M. (1976) Slab-Column Connections Subjected to High Intensity Shear and Transferring Reversed Moments. Washington.