

## Comportamento sísmico da ligação laje-pilar considerando diferentes soluções de reforço

**Brisid Isufi**

*Faculdade de Ciências e Tecnologia, UNL, Caparica, Portugal, [b.isufi@campus.fct.unl.pt](mailto:b.isufi@campus.fct.unl.pt)*

**Rui Marreiros**

*Faculdade de Ciências e Tecnologia, UNL, Caparica, Portugal, [rpcm@fct.unl.pt](mailto:rpcm@fct.unl.pt)*

**António Pinho Ramos**

*CERIS, Lisboa, Portugal; Faculdade de Ciências e Tecnologia, UNL, Caparica, Portugal, [ampr@fct.unl.pt](mailto:ampr@fct.unl.pt)*

**Válter Lúcio**

*CERIS, Lisboa, Portugal; Faculdade de Ciências e Tecnologia, UNL, Caparica, Portugal, [viql@fct.unl.pt](mailto:viql@fct.unl.pt)*

### Resumo

Durante os últimos anos foram realizadas várias séries de ensaios de modelos de ligações laje-pilar sujeitos a ações horizontais cíclicas na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa. Estes modelos foram sujeitos a ações semelhantes, utilizando um sistema de ensaio concebido para simular a continuidade da laje, tendo estas dimensões de 4.15 m × 1.85 m × 0.15 m e uma percentagem geométrica de armadura longitudinal de flexão igual a 1%. Foram utilizadas várias técnicas de reforço ao punçoamento, incluindo estribos, conectores de punçoamento, betão reforçado com fibras de aço, betão de elevada resistência e varões roscados pós-instalados. Este artigo apresenta um resumo dos referidos ensaios e uma apresentação dos principais resultados, de modo a se compararem as várias soluções apresentadas de reforço ao punçoamento, quando sujeitas a ações sísmicas. É possível verificar que a rotura ocorre para deslocamentos horizontais relativamente elevados quando se utilizam para reforço ao punçoamento estribos ou conectores de punçoamento. Pode-se ainda observar que métodos menos convencionais, como a utilização de betão reforçado com fibras e betão de elevada resistência deram resultados promissores. Comparando com os modelos de referência (sem qualquer tipo de reforço), cuja rotura ocorreu para 1% de deslocamento horizontal relativo, os outros modelos atingiram a rotura para deslocamentos significativamente mais elevados, acima dos 2.5% e chegando a ultrapassar os 6%.

**Palavras chave:** ações cíclicas; ligação laje-pilar; laje fungiforme

## 1 INTRODUÇÃO

As lajes fungiformes são uma solução estrutural utilizadas em todo o mundo em edifícios residenciais e de escritórios com estrutura em betão armado. Tradicionalmente, estas soluções são utilizadas em situações onde apenas seja necessário transmitir cargas verticais, mas com o aumento da procura por parte da indústria da construção, a sua utilização em zonas sísmicas é inevitável, devido às suas vantagens em termos de custos e de solução arquitetónica na conceção dos espaços interiores.

Os estudos científicos para a avaliação do comportamento estrutural da ligação laje-pilar iniciaram-se nos anos 1970s na Universidade de Washington [1, 2] e Universidade de Canterbury [3]. Rapidamente se percebeu que, assim como no caso das ações verticais, o risco de uma rotura por punçoamento para ações horizontais pode ser mitigada através da utilização de armadura específica de punçoamento. Desde então, várias soluções foram desenvolvidas para melhorar a capacidade de deformação das ligações laje-pilar e garantir a sua segurança quando sujeitas a deslocamentos horizontais impostos durante um sismo.

Estudos realizados permitem afirmar que o reforço ao punçoamento utilizando conectores de punçoamento é um dos mais práticos e eficientes para estruturas sujeitas a ações horizontais [4–6]. A utilização de estribos devidamente pormenorizados também pode melhorar significativamente a resposta das ligações laje-pilar sujeitas a ações horizontais [1–3, 6]. Outros sistemas de reforço, como treliças eletrossoldadas [7, 8], estribos feitos de chapa [9, 10], varões dobrados [3, 11], varões roscados pós-instalados [12–14] têm sido também estudados para a situação de ligações laje-pilar sujeita a ações horizontais.

Como alternativas aos sistemas de reforço ao punçoamento mais tradicionais, a utilização de betão de elevada resistência (BER) [15–17] e de betão armado com fibras (BRF) [18–20] têm mostrado que poderão ser uma opção viável.

Durante os últimos anos foram realizadas várias séries de ensaios de modelos de ligações laje fungiforme-pilar sujeitos a ações horizontais cíclicas na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa. Este trabalho iniciou-se com o desenvolvimento de um sistema de ensaio inovador que simula a continuidade da laje fungiforme, em particular na direção de aplicação da ação horizontal, simulando uma laje entre dois meios vãos consecutivos. Os primeiros ensaios realizados foram em lajes sem armadura específica de punçoamento, tendo-se fazendo variar a intensidade da carga vertical entre ensaios [21]. Seguidamente foram realizados ensaios em modelos com conectores de punçoamento [22, 23], estribos [24], BER [17], BRF [25] e com varões roscados pós-instalados [14]. Todos os modelos referidos tinham geometrias e armaduras longitudinais iguais, assim como o rácio entre a carga vertical aplicada e a resistência ao punçoamento centrado. Com base nos referidos ensaios, o presente artigo apresenta um resumo das principais conclusões de cada um dos trabalhos realizados e uma comparação entre as várias soluções de reforço ao punçoamento quando a estrutura está sujeita a ações sísmicas.

## 2 GEOMETRIA, SISTEMA DE ENSAIO E INSTRUMENTAÇÃO

Todos os modelos experimentais ensaiados foram construídos com as mesmas dimensões e com a mesma armadura longitudinal, como se pode observar na Figura 1. As dimensões das lajes eram 4150 mm × 1850 mm × 150 mm.

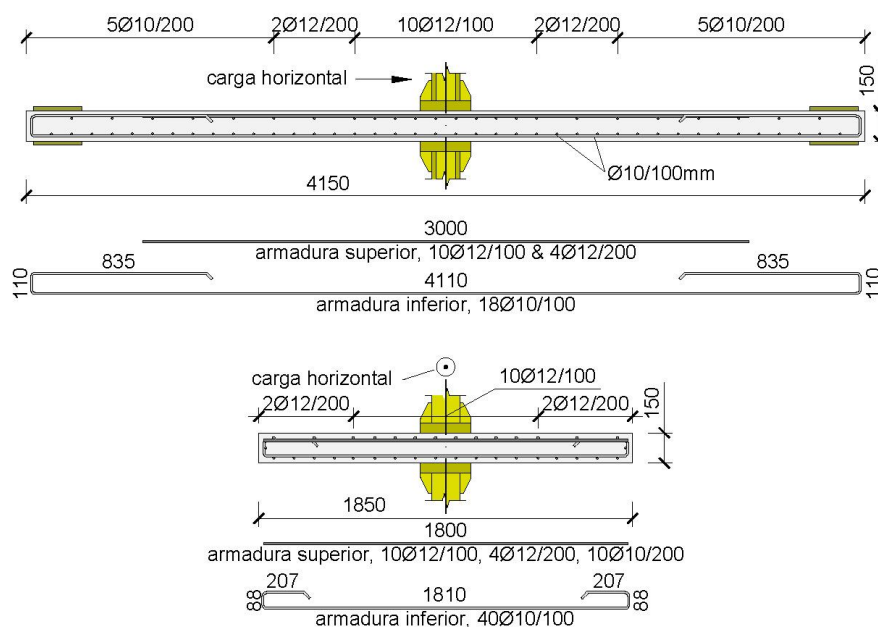


Figura 1. Pormenorização da armadura longitudinal

O sistema de ensaio utilizado garante que, na direção de aplicação dos deslocamentos horizontais, os deslocamentos verticais nos bordos opostos sejam iguais, assim como os valores absolutos do esforço transversal, momentos fletores e rotações. Permite ainda a mobilidade da posição da linha de inflexão, ou seja, ao longo do decorrer do ensaio a relação entre os momentos fletores positivos e negativos altera-se fazendo com que a linha de momento nulo mude de posição. Quando da aplicação só da carga vertical, estes bordos apresentam iguais deslocamentos verticais e iguais momentos fletores, sendo as rotações e os esforços transversos iguais a zero. Para as ações horizontais, os deslocamentos verticais são iguais e os esforços transversos são de igual valor, mas sentidos opostos. Nas Figura 2-a,b pode-se observar o sistema de ensaio quando se aplica um deslocamento horizontal. A Figura 2-c apresenta uma vista geral do sistema. Pode ser obtida mais informação respeitante a este sistema de ensaio em [21, 26].

## 3 MÉTODOS DE REFORÇO AO PUNÇOAMENTO

Até ao momento, utilizando o sistema de ensaio da Figura 2, foram testados cinco métodos de reforço ao punçoamento: a) conectores de punçoamento; b) estribos; c) varões roscados pós-instalados; d) BER; e) BRF, sendo as fibras de aço, como ilustrado na Figura 3.

Os conectores de punçoamento foram construídos a partir de varões nervurados de 8 mm de diâmetro soldados a chapas metálicas (ver Figura 3-a) tendo sido utilizados por Isufi et al. [22, 23] em quatro modelos com igual disposição, mas diferente número de perímetros. Num modelo (C-SSR3), foram utilizados três perímetros de armadura transversal, enquanto nos restantes modelos se utilizaram

cinco perímetros. Os três modelos com cinco perímetros diferiram entre si pelo valor da carga vertical aplicada.

Almeida et al. [24] ensaiou quatro modelos reforçados com estribos à volta do pilar. Foram utilizados dois rácios diferentes de armadura transversal: num caso foram utilizados 16 ramos com um diâmetro de 4.5 mm por perímetro e um rácio mais elevado foi conseguido utilizando 8 ramos de 6 mm de diâmetro e outros 8 com um diâmetro de 8 mm. O rácio mais elevado corresponde a uma quantidade total de armadura próxima da utilizada por Isufi et al. [22, 23] utilizando conectores de punçoamento. Para cada um dos rácios de armadura por perímetro, uma distribuição com 3 e outra com 5 perímetros de armadura transversal foi ensaiada, perfazendo um total de 4 modelos.

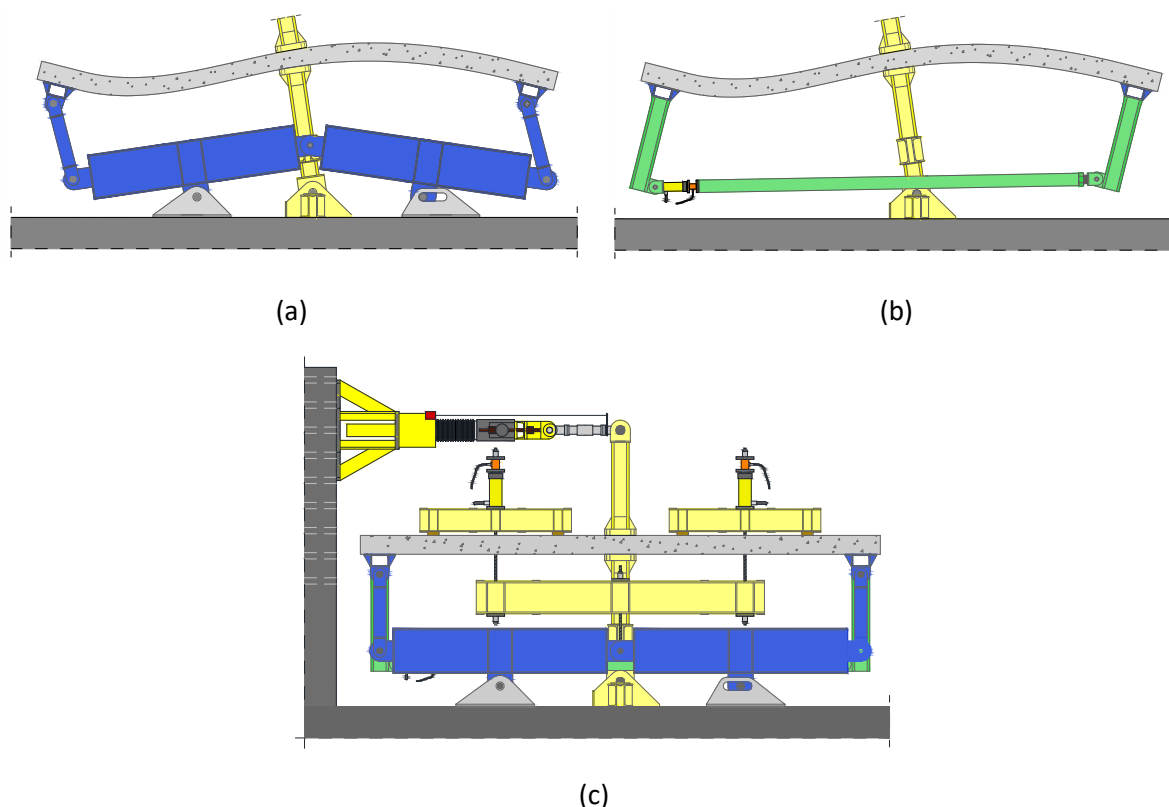


Figura 2. Sistema de ensaio: a) sistema de compatibilização dos deslocamentos verticais e esforços transversos nos bordos; b) sistema de compatibilização das rotações e momentos fletores nos bordos; c) vista geral do sistema de ensaio [26]

Três modelos foram testados por Inácio et al. [17] utilizando um uso híbrido de BER na proximidade do pilar. Num modelo, o BER foi utilizado numa camada de 50 mm a partir da base da laje, enquanto nos outros dois foi aplicado em toda a espessura da laje. Em todos os modelos, a região onde o BER foi utilizado correspondeu a um quadrado com o lado igual a 700 mm, 1150 mm e 850 mm, para os modelos CHSC1, CHSC2 e CHSC3, respetivamente.

Gouveia et al. [25] descreve os ensaios realizados a quatro modelos utilizando BRF na proximidade do pilar. Estes modelos foram sujeitos à aplicação de deslocamentos horizontais cíclicos. Os modelos diferiram entre si pela percentagem volumétrica de fibras utilizada e pelo tipo de fibra. Outra variável foi a dimensão da região onde se utilizou o BRF: no modelo com 1% de fibras e fibras do tipo 3D

(modelos F1.0\_3D) a região foi um quadrado com 700 mm de lado, enquanto nos outros foi um quadrado com 900 mm de lado.

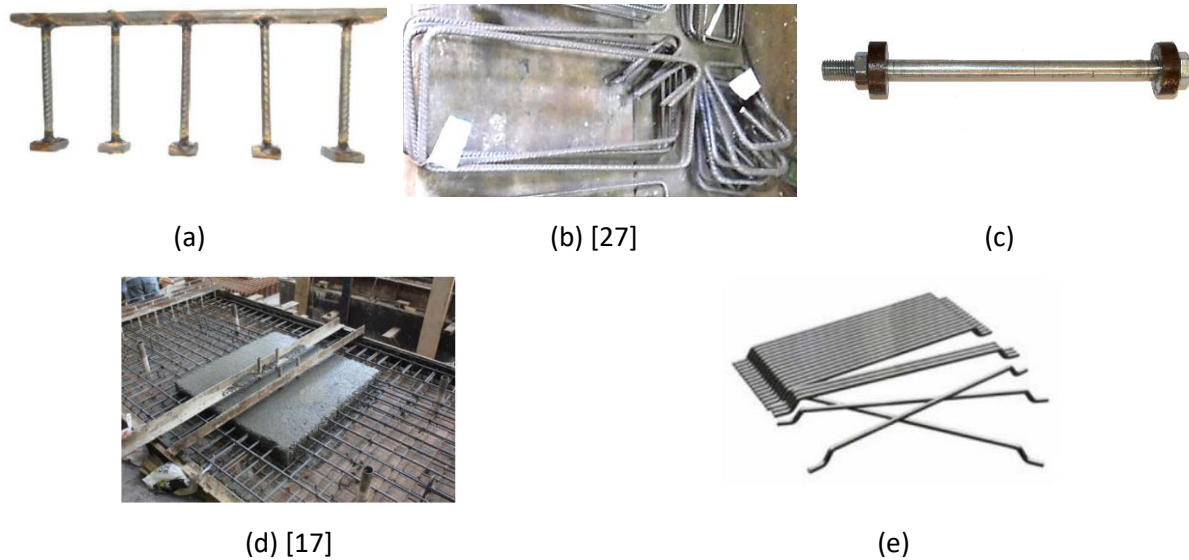


Figura 3 Métodos de reforço ao punção utilizados: a) conectores de punção; b) estribos; c) parafusos pós-instalados; d) BER na proximidade do pilar; e) fibras de aço.

Almeida et al. [14] ensaiou dois modelos reforçados com varões roscados pós-instalados em duas diferentes distribuições: radial e cruciforme. Foram utilizados três perímetros de doze parafusos M10. A pormenorização de todos os modelos referidos está resumida na Figura 4. Na Tabela 1 pode ser consultada informação complementar.

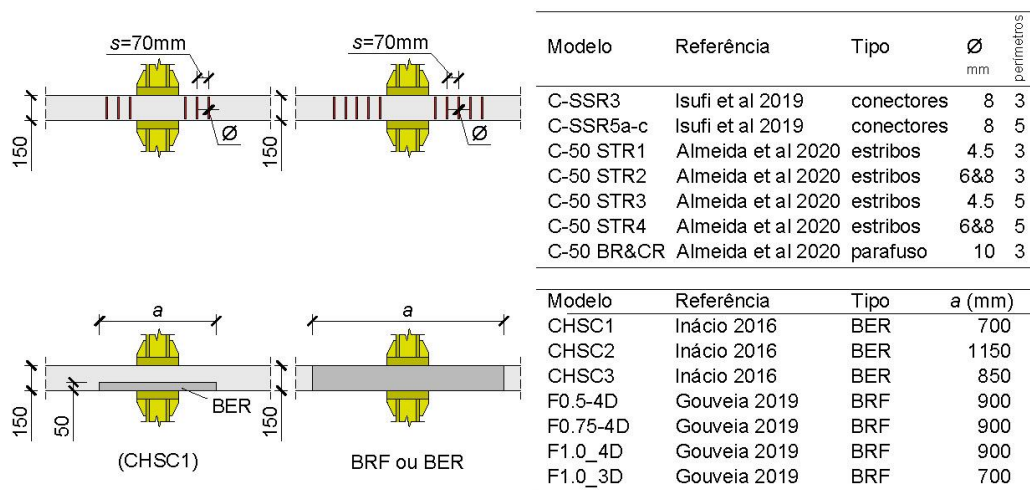


Figura 4. Resumo da armadura de punção ou das dimensões de BER ou BRF em cada modelo

#### 4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

O máximo deslocamento horizontal relativo de todos os modelos variou, mas os gráficos histeréticos foram semelhantes, sendo a resposta caracterizada por um estreitamento no gráfico histerético, como pode ser observado na Figura 5. Com exceção dos modelos C-50 BR, C-50 CR, CHSC1 e F0.5\_4D, todos apresentaram uma estabilização da força horizontal a partir de determinado deslocamento, indicando que o respetivo sistema de reforço ao punçoamento foi eficaz na promoção de roturas mais dúcteis. Todos os modelos que atingiram a estabilização na força horizontal atingiram deslocamentos horizontais relativos entre pisos (“drift”) superiores a 2%.

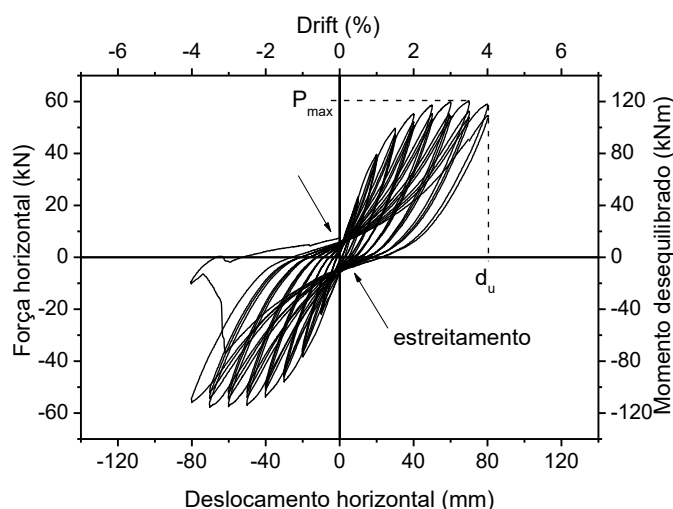


Figura 5. Gráfico força-deslocamento (modelo C-SSR3 [22])

Os deslocamentos horizontais relativos máximos entre pisos, que correspondem ao deslocamento máximo na rotura ou o deslocamento máximo do ensaio) podem ser consultados na Tabela 1. A tabela apresenta ainda a resistência à compressão do betão, obtido em cilindros com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura ( $f_c$ ), a carga vertical/gravítica aplicada ( $V_g$ ) e a força máxima horizontal obtida durante os ensaios ( $P_{max}$ ). Pode-se observar que os deslocamentos horizontais máximos alcançados nos modelos reforçados são significativamente maiores do que nos modelos de referência C-50 e C-Ref, cujos resultados podem ser consultados em detalhe em [21] e [22]. Estes modelos de referência atingiram uma rotura frágil para um deslocamento horizontal relativo igual a 1%.

Comparando resultados dos modelos apresentados na Tabela 1, é possível observar que os que alcançaram maiores deslocamentos horizontais relativos foram o modelo com 5 perímetros de conectores de punçoamento e uma mais baixa carga vertical (C-SSR5a) e o modelo com betão reforçado com 1% de rácio volumétrico de fibras de aço do tipo 4D (F1.0\_4D). Estes dois modelos não tiveram uma rotura por punçoamento antes de ser atingido o final do protocolo de ensaio, correspondente a um deslocamento horizontal relativo de 6%.

Nos ensaios realizados procurou-se não só a melhor performance em termos de deslocamento horizontal alcançado, como também a utilização racional dos materiais de reforço. Tendo isto em conta, a quantidade de reforço ao punçoamento e a extensão da zona com BRF e BER variou de modelo para modelo. Os resultados mostram que a utilização de conectores de punçoamento levou a um deslocamento horizontal relativo um pouco maior do que a utilização de estribos, quando comparando

soluções equivalentes (por exemplo, os modelos C-SSR3 e C-50 STR2 ou os modelos C-SSR5b e C-50 STR4, que tinham aproximadamente a mesma quantidade de armadura transversal). Analisando o caso dos modelos com BER, pode-se observar que os deslocamentos horizontais relativos alcançados são comparáveis com os dos modelos com armadura de punçoamento quando se utiliza este tipo de betão em toda a espessura da laje numa região limitada na proximidade do pilar. Os modelos onde se utilizou o BER só em 50 mm da parte inferior da laje alcançaram deslocamentos horizontais relativos pouco maiores do que os modelos de referência C-50 e C-Ref [21, 22]. Em trabalhos anteriores [28] ficou demonstrado que esta última solução referida funciona bem para cargas gravíticas, mas devido à possível alternância do sinal dos momentos na laje junto ao pilar, esta é menos eficaz na situação de ação horizontal.

Os modelos onde se utilizou BRF apresentaram uma resposta muito boa: foram alcançados deslocamentos horizontais relativos muito elevados utilizando esta solução na proximidade do pilar. Em alguns casos, a performance foi superior à observada nos modelos com armadura transversal de punçoamento (por exemplo, no caso do modelo F1.0\_4D, onde a rotura não ocorreu e o ensaio foi levado até ao fim do protocolo de ensaio).

Tabela 1. Descrição dos modelos e principais resultados

Modelo	Referência	Tipo	$f_c^*$ (MPa)	$V_g$ (kN)	$P_{max}$ (kN)	$d_u$ (%)
C-50	[21]	-	52.4	203	37.4	1.0
C-Ref	[22]	-	62.3	225	36.0	1.0
C-SSR3	[22]	conectores	41.2	196	60.4	4.0
C-SSR5a	[22]	conectores	27.0	169	55.2	6.0
C-SSR5b	[22]	conectores	57.6	214	58.9	5.5
C-SSR5c	[22]	conectores	69.9	275	47.9	4.0
C-50 STR1	[24]	estribos	53.1	210	49.5	2.5
C-50 STR2	[24]	estribos	52.5	216	52.0	3.0
C-50 STR3	[24]	estribos	49.2	202	59.3	3.0
C-50 STR4	[24]	estribos	44.4	196	58.4	4.0
C-50 BR	[14]	parafusos	57.6	220	61.0	3.5
C-50 CR	[14]	parafusos	58.8	222	62.2	4.0
CHSC1	[17]	BER	61.6 (115.2)	222	52.3	1.5
CHSC2	[17]	BER	45.9 (120.2)	200	55.8	3.0
CHSC3	[17]	BER	48.9 (123.6)	213	58.4	3.0
F0.5_4D	[25]	BRF	44.3 (56.6)	196	59.5	3.0
F0.75_4D	[25]	BRF	39.2 (65.0)	194	72.8	5.5
F1.0_4D	[25]	BRF	52.3 (57.9)	208	66.7	6.0
F1.0_3D	[25]	BRF	42.4 (52.3)	192	58.8	4.0

\* os valores entre parenteses correspondem ao BER e BFR

## 5 CONCLUSÕES

Neste artigo foram apresentadas as principais conclusões obtidas com uma série de ensaios experimentais em lajes fungiformes, onde se aplicaram simultaneamente ações gravíticas e deslocamentos horizontais cíclicos. Os modelos tinham igual geometria, armadura longitudinal de flexão e condições de carga, mas diferentes soluções de reforço ao punçoamento (estribos, conectores de punçoamento, varões roscados pós-instalados) assim como betão de elevada resistência e betão reforçado com fibras de aço na proximidade do pilar.

Independentemente do método de reforço, o comportamento foi caracterizado por um estreitamento no diagrama histerético e a deslocamentos horizontais relativos elevados na cedência, indicando uma baixa capacidade de dissipação de energia e uma baixa rigidez secante da ligação laje-pilar. O deslocamento horizontal relativo máximo, contudo, foi significativamente maior do que nos modelos de referência, onde foi utilizado betão normal e nenhum tipo de armadura transversal.

Foi demonstrado que a utilização de métodos de reforço ao punçoamento pode promover uma rotura por flexão e evitar ou adiar uma rotura frágil por punçoamento. Mesmo quando se utiliza uma pequena percentagem de armadura de punçoamento, como no caso do modelo C-50 STR1 com um diâmetro de 4.5 mm nos estribos, pode resultar num melhoramento significativo da capacidade de deformar das ligações laje-pilar. Comparando diferentes métodos de reforço, é de referir que os conectores de punçoamento levaram a um ligeiro incremento no deslocamento horizontal relativo máximo alcançado em relação aos modelos em que utilizou estribos. Os resultados mostram que o betão de elevada resistência e o betão reforçado com fibras são alternativas promissoras aos convencionais métodos de reforço, quando a estrutura é sujeita a ações sísmicas.

## REFERÊNCIAS

- [1] Hawkins NM, Mitchell D, Sheu MS (1974) Cyclic behavior of six reinforced concrete slab-column specimens transferring moment and shear. Seattle, Washington
- [2] Hanna SN, Mitchell D, Hawkins NM (1975) Slab – column connections containing shear reinforcement and transferring high-intensity reversed moments. Seattle, Washington
- [3] Islam S, Park R (1976) Tests on slab-column connections with shear and unbalanced flexure. J Struct Div 102:549–568
- [4] Dilger W, Cao H (1994) Strength of slab-column interior connections under reversed cyclic loading. In: Proceedings of the Fifth International Colloquium on Concrete in Developing Countries. Cairo, pp 595–608
- [5] Brown SJ (2003) Seismic response of slab column connections. University of Calgary
- [6] Robertson IN, Kawai T, Lee J, Enomoto B (2002) Cyclic Testing of Slab-Column Connections with Shear Reinforcement. ACI Struct J 99:605–613. <https://doi.org/10.14359/12300>
- [7] Park H-G, Kim Y-N, Song J-G, Kang S-M (2007) Lattice Shear Reinforcement for Slab-Column Connections. ACI Struct J 104:425–437. <https://doi.org/10.14359/18619>
- [8] Kang SM, Park HG, Kim YN (2013) Lattice-reinforced slab-column connections under cyclic lateral loading. ACI Struct J 110:929–939. <https://doi.org/10.14359/51686149>
- [9] Pilakoutas K, Li X (2003) Alternative Shear Reinforcement for Reinforced Concrete Flat Slabs. J



- Struct Eng 129:1164–1172. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:9\(1164\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:9(1164))
- [10] Kang TH-K, Wallace JW (2008) Seismic Performance of Reinforced Concrete Slab-Column Connections with Thin Plate Stirrups. *ACI Struct J* 105:617–625
- [11] Robertson I, Johnson G (2006) Cyclic lateral loading of nonductile slab-column connections. *ACI Struct J* 103:356–364
- [12] Bu W, Polak MA (2009) Seismic Retrofit of Reinforced Concrete Slab-Column Connections Using Shear Bolts. *ACI Struct J* 106:514–522. <https://doi.org/10.14359/56617>
- [13] Topuzi D, Polak MA, Narasimhan S (2017) A new technique for the seismic retrofit of Slab-Column connections. *ACI Struct J* 114:1471–1481. <https://doi.org/10.14359/51689500>
- [14] Almeida AFO, Ramos AP, Lúcio V, Marreiros R (2020) Behavior of RC flat slabs with shear bolts under reversed horizontal cyclic loading. *Struct Concr* 21:501–516. <https://doi.org/10.1002/suco.201900128>
- [15] Emam M, Marzouk H, Hilal MS (1997) Seismic response of slab-column connections constructed with high-strength concrete. *ACI Struct J* 94:197–205
- [16] Marzouk H, Osman M, Hussein A (2001) Cyclic Loading of High-Strength Lightweight Concrete Slabs. 207–214
- [17] Inácio MMG (2016) Comportamento ao Punçoamento de Lajes Fungiformes em Betão de Elevada Resistência. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa
- [18] Durrani AJ, Diaz AJ (1992) Seismic resistance of fiber-reinforced slab-column connections. In: *Earthquake Engineering, Tenth World Conference*. Balkema, Rotterdam, pp 3113–3116
- [19] Schreiber SK, Alexander SDB (2001) Punching shear capacity of slab-column connections with steel-fibre reinforcement under lateral cyclic loading. Edmonton, Alberta, Canada
- [20] Cheng M-Y, Parra-Montesinos GJ, Shield CK (2010) Shear Strength and Drift Capacity of Fiber-Reinforced Concrete Slab-Column Connections Subjected to Biaxial Displacements. *J Struct Eng* 136:1078–1088. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000213](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000213)
- [21] Almeida AFO, Inácio MMG, Lúcio VJG, Ramos AP (2016) Punching behaviour of RC flat slabs under reversed horizontal cyclic loading. *Eng Struct* 117:204–219. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.03.007>
- [22] Isufi B, Pinho Ramos A, Lúcio V (2019) Reversed horizontal cyclic loading tests of flat slab specimens with studs as shear reinforcement. *Struct Concr* 20:330–347. <https://doi.org/10.1002/suco.201800128>
- [23] Isufi B, Ramos AP, Lúcio V (2020) Post-earthquake performance of a slab-column connection with punching shear reinforcement. *J Earthq Eng (in Press)*:1–23. <https://doi.org/10.1080/13632469.2020.1713924>
- [24] Almeida AFO, Alcobia B, Ornelas M, et al (2020) Behaviour of reinforced-concrete flat slabs with stirrups under reversed horizontal cyclic loading. *Mag Concr Res* 72:339–356. <https://doi.org/10.1680/jmacr.18.00209>
- [25] Gouveia ND, Faria DM V., Ramos AP (2019) Assessment of SFRC flat slab punching behaviour – part II: reversed horizontal cyclic loading. *Mag Concr Res* 71:26–42. <https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00344>
- [26] Ramos A, Marreiros R, Almeida A, et al (2017) Punching of flat slabs under reversed horizontal cyclic loading. In: Ospina CE, Mitchell D, Muttoni A (eds) *ACI Special Publication*. ACI, fib, pp

253–272

- [27] Alcobia BMT (2015) Punçoamento Cíclico de Lajes Fungiformes com Armadura Específica
- [28] Inácio MMG, Lapi M, Pinho Ramos A (2020) Punching of reinforced concrete flat slabs – Rational use of high strength concrete. Eng Struct 206:110194.  
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110194>