

## **Estudo Experimental do Punçoamento Cíclico em Lajes Fungiformes Reforçadas com Pré-Esforço Transversal**



**Marta Luís<sup>1</sup>**



**António Pinho Ramos<sup>2</sup>**

### **RESUMO**

Apresenta-se neste trabalho uma descrição da campanha experimental realizada em modelos de laje fungiforme maciça de betão armado à escala reduzida, para estudo da técnica de reforço com recurso a parafusos pré-esforçados pós-instalados. Nesta campanha experimental foram executados e ensaiados cinco modelos. Quatro destes modelos foram reforçados com a introdução de parafusos transversais pré-esforçados, enquanto o restante foi utilizado como modelo de referência não reforçado. Como objectivos, este estudo pretendia verificar as alterações de comportamento, modo de rotura e resistência, entre ensaios com carregamento monotónico e cíclico. Dois dos modelos reforçados com parafusos verticais foram sujeitos a carregamentos crescentes monotónicos até ser atingida rotura por punçoamento, enquanto que os outros dois foram sujeitos a carregamentos cíclicos.

Os resultados experimentais obtidos são comparados com os valores previstos usando o preconizado pelo CEB-FIP Model Code 1990 [1], o Eurocódigo 2 [2] e o ACI318 – 08 [3].

### **PALAVRAS-CHAVE**

Punçoamento, Laje Fungiforme, Reforço.

<sup>1</sup> Aluna de Mestrado em Estruturas e Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Nova de Lisboa

<sup>2</sup> Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Nova de Lisboa, Investigador do UNIC – Centro de Investigação em Estruturas e Construção

## **1. INTRODUÇÃO**

As lajes fungiformes são uma solução construtiva muito utilizada dadas as vantagens que apresentam. Neste tipo de solução, devida à reacção do pilar às cargas aplicadas, surgem elevadas tensões junto a este, resultantes da interacção entre os efeitos de corte e flexão entre o pilar e a laje, devido às quais se inicia o processo de fendilhação que pode conduzir à rotura da laje por punçoamento.

A rotura por punçoamento é caracterizada pela formação de um tronco de pirâmide que tem tendência para se desligar do resto da laje. Esta rotura localizada pode dar início a uma rotura progressiva e a um colapso total da estrutura, já que, a perda de um ponto de apoio vai aumentar os esforços de punçoamento nos apoios vizinhos devido ao incremento de carga. Este mecanismo de colapso local está associado a uma rotura repentina, sem qualquer ductilidade.

Alguns dos actuais sistemas estruturais em laje fungiforme não apresentam uma adequada segurança contra a rotura por punçoamento. O aumento da carga de serviço com a alteração do uso da estrutura, erros de projecto e erros de execução são algumas das razões para este facto. Como consequência, aconteceram alguns acidentes nos últimos anos que alertaram os especialistas para o problema da segurança ao punçoamento em edifícios já existentes. Entre estes acidentes destaca-se um bastante mediático, o colapso total do Sampoong Department Store em Seul devido a alterações da carga permanente, betão de resistência inferior à necessária, pilares de diâmetro inferior ao recomendado e espessura da laje insuficiente. Com o objectivo de evitar estes acidentes têm sido desenvolvidas algumas técnicas de reforço ao punçoamento em lajes fungiformes.

Uma das possíveis técnicas de reforço é a utilização de parafusos verticais, geralmente pré-esforçados, que atravessam a laje em toda a sua espessura, sendo ancorados junto às suas faces. É esta técnica de reforço que vai ser abordada neste artigo. Este método já foi estudado por alguns autores, nomeadamente, Ghali [4], Ramos [5,6], Menétray [7], El-Salakawy [8], Harajli [9] e Duarte [10,11]. Relativamente a este último autor, vão ser aqui utilizados alguns dos seus resultados experimentais para comparação.

## **2. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS**

Neste documento pretende-se divulgar os resultados de ensaios ao punçoamento realizados em modelos à escala reduzida de laje fungiforme maciça. Todos os modelos, excepto o de referência, foram reforçados com parafusos verticais pré-esforçados. Estes modelos apresentam dimensões em planta de  $1.80 \times 1.80 \text{ m}^2$ , uma espessura de 0.12 m e simulam a zona de momentos negativos junto ao pilar limitada pelas linhas de inflexão, onde os momentos flectores são nulos. O pilar foi materializado por uma placa de aço de dimensões  $0.20 \times 0.20 \text{ m}^2$  e 50 mm de espessura.

A armadura superior dos modelos é constituída por uma malha quadrada de  $\varnothing 10/0.075$  e a inferior por uma malha quadrada de  $\varnothing 6/0.20$ . O recobrimento é de aproximadamente 20 mm na face superior e 10 mm na face inferior. Estas armaduras foram dimensionadas com o objectivo de se obter uma rotura por punçoamento.

Todos os modelos reforçados foram numa primeira fase fendilhados através da aplicação de uma carga de aproximadamente 160 kN, correspondente a cerca de 60% da carga de rotura do modelo de referência (não reforçado). Esta carga foi aplicada ao pilar central através de um macaco hidráulico. Após ter sido atingido este valor para o carregamento vertical, procedeu-se à descarga das lajes e às operações de reforço.



Figura 1. Aspecto geral dos ensaios

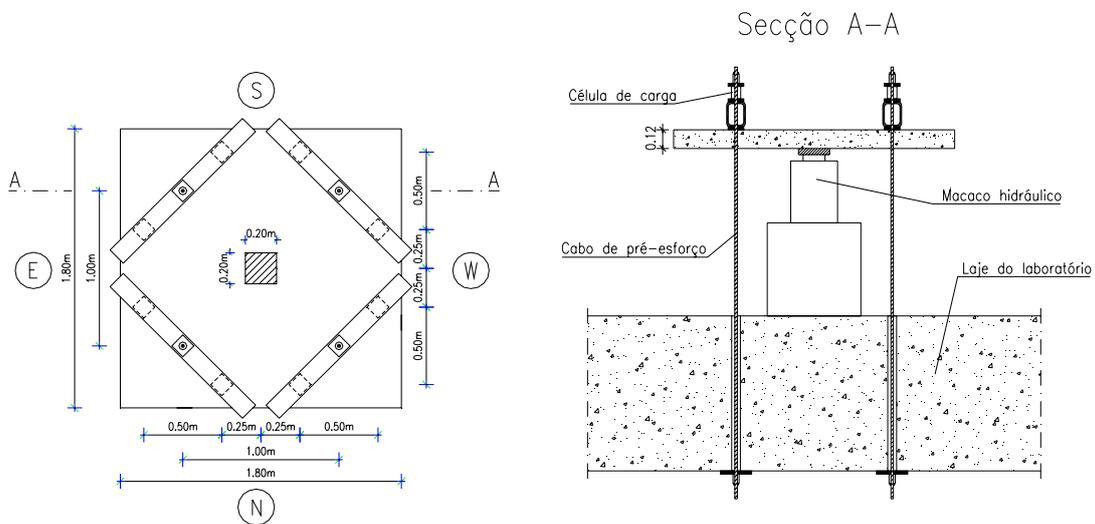


Figura 2 – Definição geométrica dos modelos

Foram então colocados dezasseis parafusos transversais, obtidos a partir de varões rosçados, em duas camadas em torno do pilar. Estes foram ancorados às faces inferior e superior com placas de aço de  $150 \times 50 \text{ mm}^2$  e espessura de 5 mm como mostra a Figura 3. Foram utilizados parafusos M8 e M6 de acordo com a Figura 5.

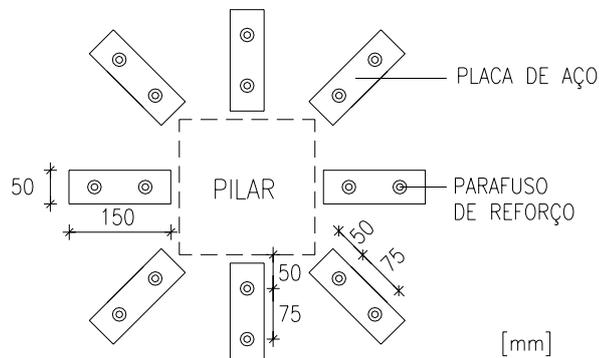


Figura 3. Geometria do reforço

O pré-esforço foi aplicado aos parafusos através de uma chave dinamométrica. As forças médias iniciais nos parafusos foram de 2.9 kN nos modelos em que foram utilizados parafusos M6 (ID3 e ML1) e 6.7 kN nos modelos com parafusos M8 (ID4 e ML2).



Figura 4. Vista inferior e superior do reforço

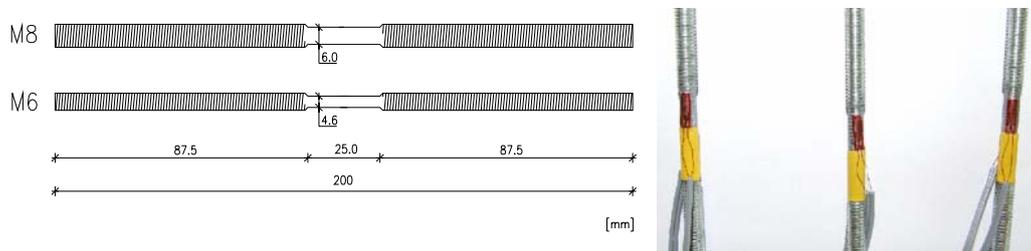


Figura 5. Parafusos de reforço

Os modelos ID1, ID3 e ID4 foram levados à rotura através da aplicação monotónica da carga no pilar central, enquanto que os modelos ML1 e ML2 foram carregados ciclicamente. O carregamento cíclico foi efectuado em 3 ciclos da mesma carga, mantendo a carga inferior de cada ciclo nos 160 kN e fazendo acréscimos sucessivos de 10 kN aos valores de pico, como mostra a Figura 6.

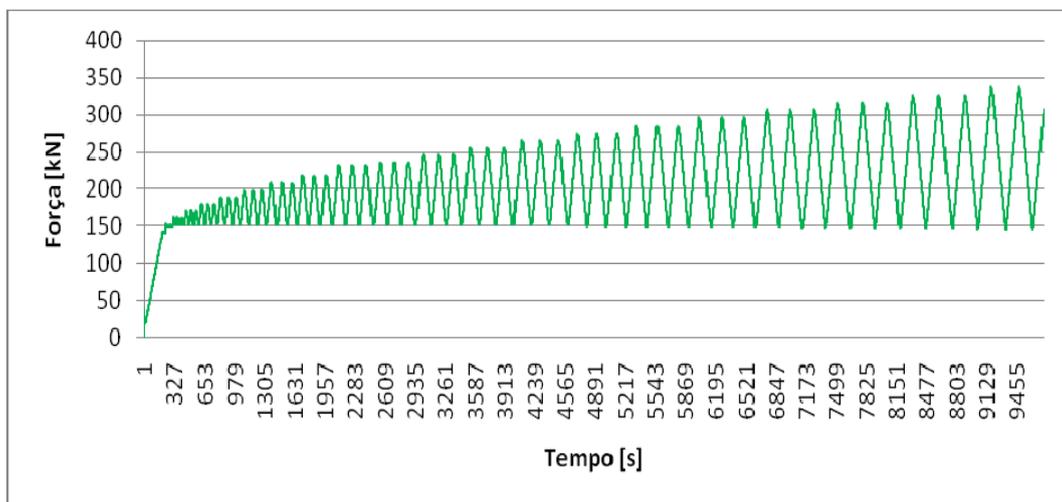


Figura 6. Ciclos de carga aplicados ao modelo ML2

A instrumentação utilizada consistiu em seis extensómetros colados em três varões da armadura longitudinal superior, em dezasseis extensómetros colocados em oito parafusos de reforço, quatro células de carga e cinco LVDT para medição dos deslocamentos verticais dos modelos.

### 3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para caracterizar o betão ensaiou-se cubos com 150 mm de lado à compressão. Os valores de  $f_{ccm}$  foram obtidos directamente dos ensaios e os valores da tensão média de rotura à compressão em provetes cilíndricos ( $f_{cm}$ ) foi calculada como sendo 80% de  $f_{ccm}$ . As armaduras longitudinais e os parafusos de reforço foram ensaiados à tracção e os resultados são apresentados no Quadro 2. Quanto à força limite convencional de proporcionalidade a 0.2% média dos parafusos, é de 5.8 kN nos M6 e 12.5 kN nos M8.

Quadro 1. Caracterização do betão dos modelos

Modelo	$f_{cmm}$ [MPa]	$f_{cm}$ [Mpa]	Dias
ID1	49,2	39,3	65
ID3	59,6	47,7	81
ID4	59,7	47,7	99
ML1	49,3	39,4	111
ML2	49,3	39,4	106

Quadro 2. Caracterização das armaduras longitudinais e dos parafusos de reforço

	Ø 6	Ø 10	M6	M8
$f_{sy}$ [MPa]	588	445	349	442
$f_{su}$ [MPa]	697	582	505	605

### 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Todos os modelos ensaiados atingiram a rotura por punçoamento. As respectivas cargas máximas experimentais, incluindo o peso próprio ( $V_{exp}$ ), são apresentadas no Quadro 3.

No modelo de referência (ID1) as primeiras fendas de flexão tornaram-se visíveis para uma carga de aproximadamente 95 kN e com o aumento da carga vertical, começaram a aparecer as fendas radiais que se estenderam para fora da área carregada em direcção aos limites do modelo. A superfície de rotura teve a forma de um tronco de pirâmide compreendido entre a área carregada e um perímetro definido a aproximadamente uma distância de  $2d$  do pilar.

Nos modelos reforçados a evolução da fendilhação foi semelhante à do modelo ID1. A rotura dos modelos ID3 e ML1 (parafusos M6) deu-se pelo interior do reforço ao contrário dos modelos ID4 e ML2 (parafusos M8) que foi pelo exterior do reforço. Verificou-se também que a inclinação da superfície de rotura aumentou com a adição dos parafusos.

A força nos parafusos manteve-se sensivelmente constante até à carga aplicada ser da ordem de grandeza da carga de rotura do modelo de referência (ID1). A partir deste valor a força nos parafusos sofreu um incremento brusco. Nos modelos reforçados com parafusos M6 vários destes atingiram a rotura. De facto no modelo ID3 onze parafusos romperam, enquanto no modelo ML1 todos os parafusos atingiram a rotura, com excepção de um deles. Nos modelos ML2 e ID4 não se verificou a rotura de nenhum dos parafusos.

*Estudo Experimental do Punçoamento Cíclico em Lajes Fungiformes  
Reforçadas com Pré-Esforço Transversal*



Figura 7. Vista inferior e superior do modelo ID1 (referência)



Figura 8. Vista inferior e superior do modelo ML1 após a rotura



Figura 9. Parafusos dos modelos ID3 e ML1 após a rotura

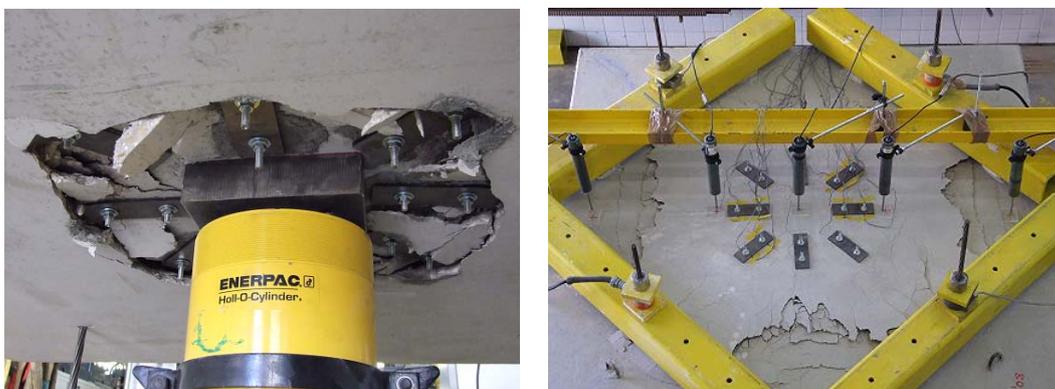


Figura 10. Vista inferior e superior do modelo ML2 após a rotura

## 5. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E OS PREVISTOS NOS REGULAMENTOS

Neste ponto faz-se a comparação entre as cargas máximas obtidas experimentalmente e as previsões usando o preconizado pelo EC2 [2], CEB – FIP Model Code de 1990 [1] e ACI 318 – 08 [3], sabendo que as disposições do EC2 são idênticas às do MC 90, diferindo apenas na nomenclatura.

Começando pelo EC2, o valor da resistência sem armaduras de punçoamento é dado pela Eq (1):

$$V_{Rm1} = 0.18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{cm})^{1/3} \cdot u \cdot d \quad (1)$$

Onde  $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}}$  ( $d$  em mm),  $\rho_l = \sqrt{\rho_x \cdot \rho_y} \leq 0.02$  em que  $\rho_x$  e  $\rho_y$  são as percentagens geométricas das armaduras de flexão dos modelos,  $f_{cm}$  é a tensão média de rotura à compressão de betão em provetes cilíndricos em MPa,  $d$  é a altura útil e  $u$  é o perímetro de controlo de referência definido a  $2d$  da área carregada, neste caso para um pilar quadrado de lado  $c$ ,  $u = 4 \cdot c + 4 \cdot \pi \cdot d$ . Os valores de  $\rho_x$  e  $\rho_y$  são calculados para uma largura igual à dimensão do pilar mais  $3d$  para cada lado. Neste regulamento o valor de  $k$  é limitado a 2.0, no entanto esta limitação não foi considerada nos cálculos que se apresentam em seguida.

Na situação de serem utilizados parafusos de reforço, o valor médio da resistência ao punçoamento foi calculado pela seguinte expressão:

$$V_{Rm2} = 0.75 \cdot V_{Rm1} + F_{p0.2} \cdot n^\circ \text{ parafusos} \quad (2)$$

Em que o  $F_{p0.2}$  é o valor da força média limite convencional de proporcionalidade a 0.2% do aço dos parafusos que se encontram até  $2d$  da face do pilar.

Caso a rotura ocorra pelo exterior do reforço, o valor médio da força resistente ao punçoamento em lajes fungiformes com armadura específica de punçoamento é calculado pela Eq. (3):

$$V_{Rm3} = 0.18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{cm})^{1/3} \cdot u^* \cdot d \quad (3)$$

Em que  $u^*$  é o perímetro de contorno de referência definido a uma distância de  $2d$  do perímetro definido pelas armaduras de reforço.

O ACI 318 – 08 define o valor médio da resistência ao punçoamento sem armadura específica ( $V_{Rm1}$ ) como o menor valor resultante das seguintes expressões:

$$\left(1 + \frac{2}{\beta_c}\right) \cdot \frac{\sqrt{f_{cm}} \cdot u \cdot d}{6} \quad (4)$$

$$\left(\alpha_s \cdot \frac{d}{u} + 2\right) \cdot \frac{\sqrt{f_{cm}} \cdot u \cdot d}{12} \quad (5)$$

$$\frac{1}{3} \cdot \sqrt{f_{cm}} \cdot u \cdot d \quad (6)$$

Onde  $\beta_c$  é o quociente entre o lado maior e o lado menor do pilar,  $\alpha_s$  toma os valores de 40 para pilares interiores, 30 para pilares de bordo e 20 para pilares de canto. Neste regulamento o perímetro de contorno de referência  $u$ , é determinado a uma distância de  $0.5d$  da face do pilar.

No caso de se adoptarem armaduras específicas de punçoamento, o ACI 318 – 08 apresenta a Eq. (7) para o cálculo do esforço médio resistente ao punçoamento ( $V_{Rm2}$ ):

$$V_{Rm2} = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{f_{cm}} \cdot u \cdot d + F_{p0,2} \cdot n^{\circ} \text{ parafusos} \quad (7)$$

Este regulamento define que em roturas pelo exterior do reforço, o valor médio da resistência ao punçoamento é dado pelo valor mínimo resultante das expressões que se seguem ( $V_{Rm3}$ ):

$$\left(1 + \frac{2}{\beta_c}\right) \cdot \frac{\sqrt{f_{cm}} \cdot u^* \cdot d}{6} \quad (8)$$

$$\left(\alpha_s \cdot \frac{d}{u} + 2\right) \cdot \frac{\sqrt{f_{cm}} \cdot u^* \cdot d}{12} \quad (9)$$

$$\frac{1}{3} \cdot \sqrt{f_{cm}} \cdot u^* \cdot d \quad (10)$$

O perímetro de referência  $u^*$  é calculado a uma distância de  $d/2$  do perímetro delimitado pelas armaduras de reforço.

Quadro 3. Comparação dos resultados experimentais com as previsões regulamentares

	Modelo	Reforço	$V_{exp}$ [kN]	Regulamento	$V_{Rm1}$ [kN]	$V_{Rm2}$ [kN]	$V_{Rm3}$ [kN]	$V_{exp}/V_{Rm}$
<b>Monotónicos</b>	ID1	-	269	EC2 / MC90	<b>274</b>	-	-	0,98
				ACI 318-08	<b>196</b>	-	-	1,38
	ID3	M6	331	EC2 / MC90	298	<b>316</b>	430	1,05
				ACI 318-08	-	<b>204</b>	375	1,62
	ID4	M8	381	EC2 / MC90	300	<b>425</b>	432	0,90
				ACI 318-08	-	<b>313</b>	380	1,22
<b>Cíclicos</b>	ML1	M6	337	EC2 / MC90	290	<b>310</b>	418	1,09
				ACI 318-08	-	<b>208</b>	408	1,62
	ML2	M8	349	EC2/MC90	292	<b>419</b>	422	0,83
				ACI 318-08	-	<b>316</b>	414	1,10

$V_{exp}$  – carga máxima experimental;

$V_{Rm}$  – para os modelos reforçados: mínimo entre  $V_{Rm2}$  e  $V_{Rm3}$ ; para o modelo ID1:  $V_{Rm1}$ .

Da análise do Quadro 3 pode-se concluir que a utilização dos parafusos verticais de reforço pré-esforçados leva a um incremento significativo da carga de rotura dos modelos ensaiados. De facto nos modelos reforçados com parafusos M6 obteve-se um incremento do valor máximo da carga

experimental entre 23% e 25%, enquanto que nos modelos reforçados com parafusos M8 este incremento variou entre 30% e 42%, quando comparados com o modelo de referência.

Os valores previstos pelo EC2/MC90 para o valor médio resistente da carga de rotura ao punçoamento são próximos dos valores obtidos experimentalmente, dando uma média para a razão  $V_{exp}/V_{Rm}$  de 0,98 para os ensaios monotónicos e de 0,96 para os ensaios cíclicos. Estes valores são ligeiramente contra a segurança. No entanto há que referir que os limites preconizados no EC2 para o valor do  $k$  e para a tensão na armadura específica de punçoamento não foram respeitados nos cálculos apresentados.

Em relação ao ACI-318-08 conclui-se que este código é bastante conservador, originando valores resistentes previstos superiores aos experimentais.

Comparando entre a acção monotónica e cíclica observa-se, em termos médios, uma ligeira diminuição da razão  $V_{exp}/V_{Rm}$  na situação de carregamento cíclico (de 0,98 para 0,96).

Ambos os regulamentos prevêm correctamente o modo de rotura dos modelos reforçados com parafusos M6 e falham nos reforçados com M8. No entanto à que referir que os valores previstos pelo EC2/MC90 para a rotura pelo exterior ( $V_{Rm2}$ ) são bastante próximos aos da rotura pelo exterior do reforço ( $V_{Rm3}$ ) nos modelos ID4 e ML2 (reforçados com parafusos M8).

Quadro 4. Comparação entre modos de rotura

	<b>Modelo</b>	<b>Reforço</b>	<b>Regulamento</b>	<b>Modo de rotura previsto</b>	<b>Modo de rotura experimental</b>
<b>Monotónicos</b>	ID3	M6	EC2 / MC90	Interior ao reforço	Interior ao reforço
			ACI 318-08	Interior ao reforço	
	ID4	M8	EC2 / MC90	Interior ao reforço	Exterior ao reforço
			ACI 318-08	Interior ao reforço	
<b>Cíclicos</b>	ML1	M6	EC2 / MC90	Interior ao reforço	Interior ao reforço
			ACI 318-08	Interior ao reforço	
	ML2	M8	EC2/MC90	Interior ao reforço	Exterior ao reforço
			ACI 318-08	Interior ao reforço	

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Descreveu-se neste artigo os ensaios experimentais de modelos de lajes fungiformes reforçadas com parafusos verticais pré-esforçados. Verificou-se que esta técnica simples, económica e de rápida execução aumenta significativamente a resistência das lajes ao punçoamento. Este aumento é visível tanto em lajes sujeitas a carregamentos monotónicos como em cíclicos.

Os valores previstos para o valor médio do esforço resistente ao punçoamento utilizando o preconizado pelo EC2 estão próximos dos valores experimentais obtidos.

O ACI 318-08 é bastante conservador, originando previsões para o valor médio do esforço resistente ao punçoamento claramente inferiores aos obtidos experimentalmente.

## **7. AGRADECIMENTOS**

Manifestamos reconhecimento à Concremat, S.A. pela fabricação dos modelos utilizados nesta campanha experimental.

## **REFERÊNCIAS**

- [1] EN Comité Euro-International du Béton: *CEB-FIP Model Code 1990*, Bulletin d'information nº 213-214, Maio, 1993.
- [2] EN 1992-1-1: 2004, "Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings".
- [3] ACI Committee 318. 318M-08 Metric Building Code Requirements for Structural Concrete & Commentary. American Concrete Institute, Farmington Hills, 2008, 436 pp.
- [4] Ghali, A.; Sargious, M. A.; Huizer, A.: "*Vertical Prestressing of Flat Slabs Around Columns*", Shear in Reinforced Concrete, ACI, Special Publication SP 42, 1974, Detroit, Vol. 2, 905-920.
- [5] Ramos, A. M.: "*Reparação e Reforço de Lajes Fungiformes ao Punçoamento*", Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 1995.
- [6] Ramos, A. M. P.; Lúcio, V. e Regan, P. E., "*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, Stockholm, Junho, 2000.
- [7] Menétrey, Ph.; Bruhwiler E.: "*Shear strengthening of existing reinforced concrete slabs under concentrated loads*", Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Département de Génie Civil, 1996.
- [8] El-Salakawy, E.; Soudki, K.; Polak, M. A.: "*Punching Shear Behaviour of Flat Slabs Strengthened with Fiber Reinforced Polymer Laminates*", Journal of Composites for Construction, ASCE, September/October, 2004.
- [9] Harajli, M. H.; Soudki, K. A.; Kudsi, T.: "*Strengthening of Interior Slab-Column Connections Using a Combination of FRP Sheets and Steel Bolts*", Journal of Composites for Construction, ASCE, September/October, 2006.
- [10] Duarte, I.: "*Comportamento ao Punçoamento de Lajes Fungiformes Reforçadas com Parafusos*", Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2008.
- [11] Duarte, I.; Ramos, A. e Lúcio, V.: "*Strengthening of Flat Slabs with Transverse Reinforcement*", Proceedings of CCC 2008 - Challenges for Civil Construction, FEUP, Porto, Abril, 2008.