

## SISTEMAS DE REFORÇO DE LAJES FUNGIFORMES



**DUARTE FARIA**  
Aluno Doutoramento  
DEC – FCT  
Universidade Nova  
Lisboa - Portugal



**VÁLTER LÚCIO**  
Professor Associado  
DEC – FCT  
Universidade Nova  
Lisboa - Portugal



**ANTÓNIO RAMOS**  
Professor Auxiliar  
DEC – FCT - UNIC  
Universidade Nova  
Lisboa - Portugal

### Resumo

A adoção de lajes fungiformes em edifícios é comum, uma vez que esta constitui uma solução económica tendo em conta a sua rapidez e facilidade construtiva. No entanto, apresenta a desvantagem de por haver uma ligação direta entre a laje e o pilar, surgirem elevadas concentrações de tensões na sua vizinhança. A generalização da sua construção nos últimos anos tem levado ao surgimento de mais casos em que é necessário recorrer a operações de reforço, pelo que surgiu também a necessidade de se estudarem sistemas de reforço adequados. Neste trabalho descrevem-se os sistemas que têm sido estudados e desenvolvidos na FCT/UNL, incluindo resultados experimentais. Estes sistemas são o do reforço de lajes com introdução de armaduras verticais e o reforço de lajes recorrendo a pós-tensão com ancoragens por aderência.

### Palavras Chave

Reforço, Lajes Fungiformes, Lajes, Investigação, Experimentação

## 1 Introdução

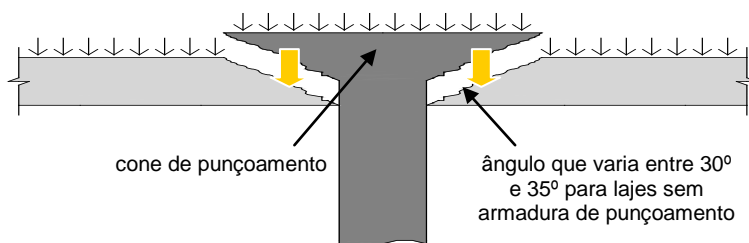
Dada a elevada adoção de construção de lajes fungiformes, justifica-se o estudo de técnicas capazes de reforçar as mesmas. As lajes fungiformes são lajes que apoiam diretamente em pilares pelo que permitem opções arquitetónicas mais arrojadas, grande versatilidade na ocupação dos espaços interiores, maior facilidade na execução das instalações técnicas e simplicidade e rapidez na construção. Estes reforços têm por objectivo solucionar problemas causados por uma ou várias das seguintes razões: erros construtivos e/ou de projeto; alteração de uso da estrutura; causas acidentais; e degradação dos materiais.

## 2 Rotura Por Punçoamento

### 2.1 Considerações Gerais

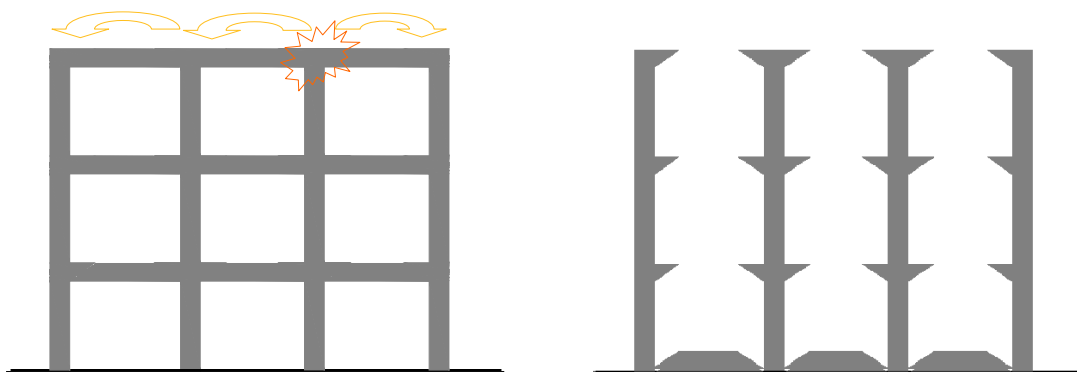
Um dos maiores inconvenientes deste sistema tem a ver com a existência de uma elevada concentração de tensões na zona de ligação laje-pilar. Um dos principais problemas que podem

surgir neste tipo de estrutura é a ocorrência de uma rotura por punçoamento. Neste fenómeno o pilar “fura” a laje, tratando-se um mecanismo de colapso local do tipo frágil (**Fig. 1**).



**Fig. 1** Rotura por punçoamento

Quando ocorre a rotura por punçoamento num dos pilares, dá-se um aumento da solicitação dos restantes pilares, podendo este incremento de esforços levar à rotura por punçoamento junto a estes. Este fenómeno pode originar um colapso progressivo parcial ou total da estrutura (**Fig. 2**).



**Fig. 2** Esquema de desenvolvimento de um colapso progressivo total

Este tipo de fenómeno foi já registado em diversos acidentes cujas principais causas estavam relacionadas com deficiências construtivas de cálculo e construtivas [1-4].

Por forma a evitar este tipo de colapso, podem ser adotados diversos sistemas de reforço, sendo os mais conhecidos o do reforço por aumento de secção, reforço por introdução de novas armaduras, por colagem de chapas metálicas, pela instalação de capitéis, através da introdução de novas armaduras transversais e através de pré-esforço. Informação relativa a estes sistemas pode ser consultada em [5-10]. No capítulo seguinte descrevem-se os trabalhos que têm sido desenvolvidos na FCT/UNL tendo por base resultados experimentais.

### 3 Investigação sobre Reforço de Lajes Fungiformes ao Punçoamento no DEC/FCT/UNL

#### 3.1 Introdução

A investigação relacionada com o reforço de lajes fungiformes ao punçoamento foi iniciada no trabalho de mestrado [11] do Prof. António Ramos, orientado pelo Prof. Válder Lúcio no IST/UTL

em 1995. Desde então, e já na FCT/UNL, esta investigação teve desenvolvimentos em vários trabalhos de mestrado orientados pelo Prof. António Ramos que se referem de seguida:

- Inácio Duarte (2008) – Comportamento ao Punçoamento de Lajes Fungiformes Reforçadas com Parafusos [12];
- Marta Luís (2010) – Punçoamento Cíclico de Lajes Fungiformes Reforçadas com Pré-Esforço Transversal [13];
- Micael Inácio (2010) - Comportamento ao Punçoamento de Lajes Fungiformes Reforçadas com Parafusos – Efeito da Área e Posicionamento da Ancoragem [14];
- Jorge Gomes (2011) - Efeito da Aderência na Resistência ao Punçoamento de Lajes Fungiformes Reforçadas com Parafusos Transversais [15].

Estes trabalhos e as suas principais conclusões são brevemente descritas na secção 3.2.

Recentemente foi também concebido e estudado um novo sistema de reforço de lajes recorrendo a pós-tensão com ancoragens por aderência que será descrito na secção 3.3. Este trabalho foi estudado e desenvolvido no âmbito da tese de doutoramento do Eng.º Duarte Faria sob orientação dos Professores Válder Lúcio e do Professor António Ramos.

## 3.2 Introdução de Armaduras Transversais

### 3.2.1 Ramos [11]

Foram ensaiados dois modelos de lajes fungiformes maciças quadradas com 2000 mm de lado e 100 mm de espessura, reforçadas ao punçoamento com parafusos pré-esforçados (**Fig. 3**). Os oito parafusos usados foram ancorados com placas de aço, nas superfícies superior e inferior, de modo a distribuir a força de pré-esforço na área da placa. As lajes foram previamente carregadas até cerca de 70% da carga de rotura prevista sem reforço (146 kN). Foi registado um aumento da resistência de 21% e 25% em relação à resistência prevista sem reforço.

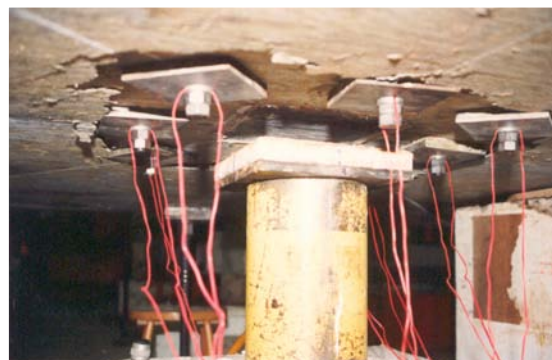
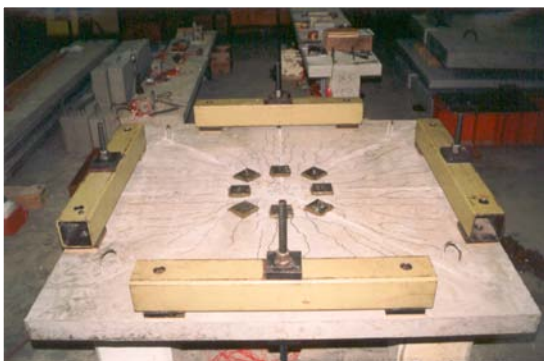


Fig. 3 Reforço por introdução de armaduras transversais, Ramos [11]

### 3.2.2 Inácio Duarte [12]

Foram ensaiados cinco modelos quadrados de laje fungiforme com 1800 mm de lado e uma espessura de 120 mm, sendo uma das lajes a de referência (ID1), e as restantes quatro (ID2 a ID5) reforçadas com dezasseis parafusos transversais (**Fig. 4**). As variáveis deste trabalho experimental foram a área transversal de armadura de reforço e o pré-esforço inicial aplicado aos parafusos.



Fig. 4 Reforço por introdução de armaduras transversais, Inácio Duarte [12]

Os resultados mostraram um aumento considerável da capacidade de carga das lajes tendo-se atingido um incremento máximo de 51%.

### 3.2.3 Marta Luís [13]

Foram ensaiados dois modelos de laje fungiforme em tudo idênticos aos modelos de Inácio Duarte (secção 3.2.2) [3]. Os modelos, numa primeira fase, foram carregados por intermédio de um macaco hidráulico, até se atingir uma força correspondente a cerca de 60 % da carga de rotura do modelo referência. Após ter sido atingida esta carga efectuou-se a descarga das lajes e as operações de reparação. Nesta fase os modelos foram carregados até à rotura através de um carregamento cíclico (Fig. 5). Os resultados mostraram um aumento considerável da capacidade de carga das lajes tendo-se atingido um incremento máximo de 32%.

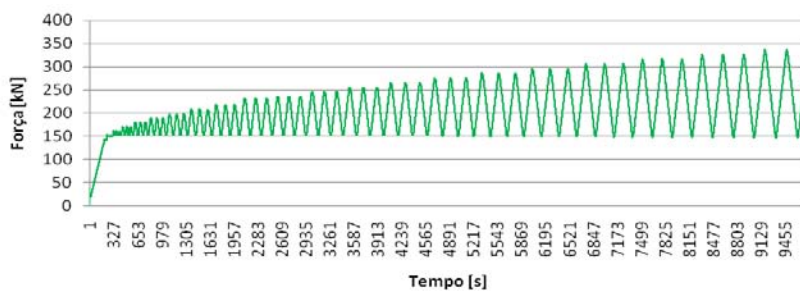


Fig. 5 Desenvolvimento do carregamento cíclico, Marta Luís [13]

### 3.2.4 Micael Inácio [14]

Neste trabalho foram ensaiados quatro modelos de laje fungiformes, que tinham como principal objectivo verificar as alterações provocadas no comportamento ao punçoamento devido à alteração da área e posicionamento da ancoragem (Fig. 6).

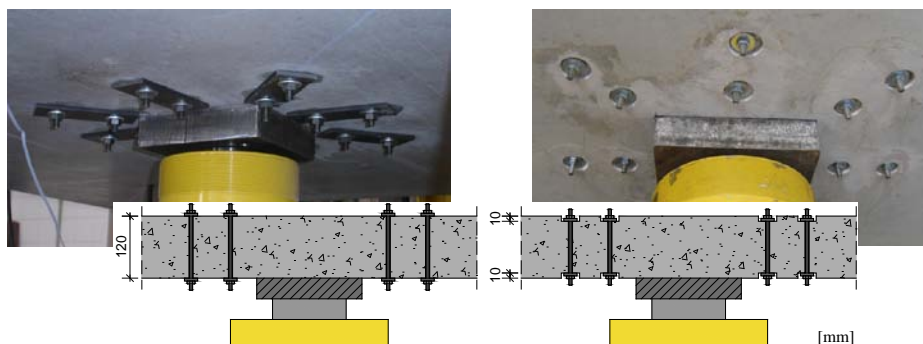


Fig. 6 Ensaios de Micael Inácio [14]

Os resultados experimentais permitiram concluir que a diminuição da área de ancoragem não provocou perda de capacidade resistente e que a utilização de chapas de ancoragem de pequenas dimensões embutidas na espessura da laje originou uma ligeira perda de eficácia do sistema de reforço.

### 3.2.5 Jorge Gomes [15]

Neste trabalho foram ensaiados dois modelos de laje fungiformes, que tinham como principal objectivo verificar as alterações de comportamento, modo de rotura e carga última experimental entre ensaios monotónicos aderentes e não aderentes (**Fig. 7**).

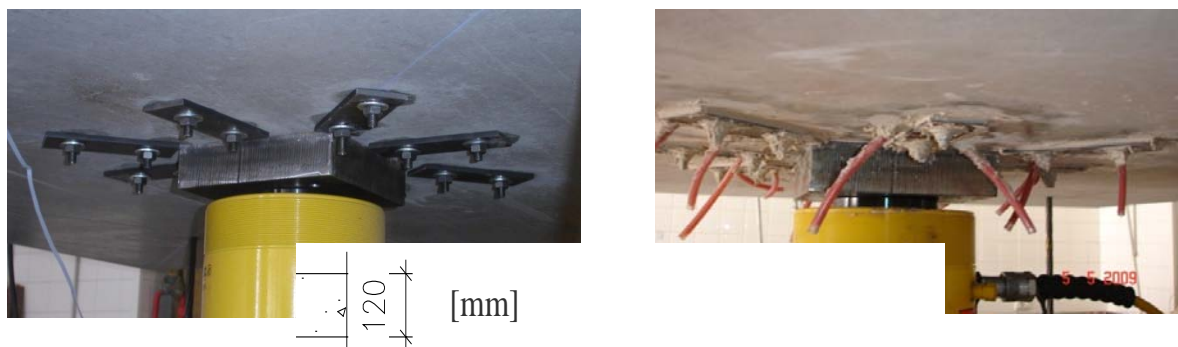


Fig. 7 Ensaios de Jorge Gomes [15]

As principais conclusões foram que ocorreram incrementos de resistência substanciais nos modelos reforçados, especialmente com ligação do tipo aderente:

- variou de 15% (M6) a 32% (M8) (não aderente);
- variou de 37% (M8b) a 42% (M6b) (aderente);
- a existência de aderência entre os parafusos de reforço e a laje, contribui para um melhor desempenho desta solução.

### 3.3 Novo sistema de reforço de lajes usando pré-esforço com ancoragens por aderência [16-19]

Neste trabalho é proposto um sistema de reforço recorrendo a pós-tensão que apresenta-se como uma alternativa ao sistema tradicional de reforço com pré-esforço. Este tipo de sistema permite diminuir os esforços/tensões nos elementos e simultaneamente contribuir para uma redução da abertura de fendas e de deformações. Na **Fig. 8** observa-se o aspeto final do reforço aplicado a uma laje, e indicam-se os ponto de aplicação das forças de desvio e das forças horizontais devidas ao pré-esforço.

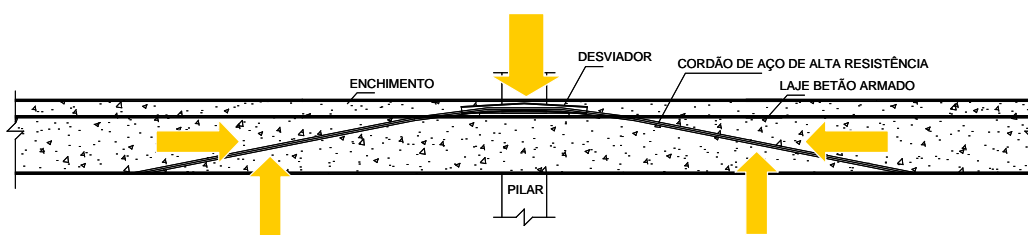


Fig. 8 Aspeto final de uma laje reforçada [16-19]

### 3.3.1 Processo Construtivo

O sistema construtivo é constituído por 5 tarefas principais:

#### 1-Furação da laje e limpeza dos furos (Fig. 9)

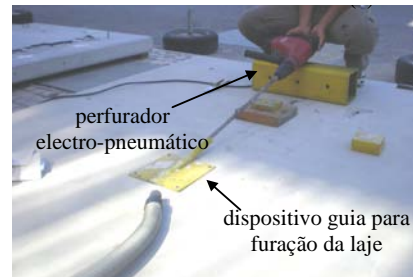
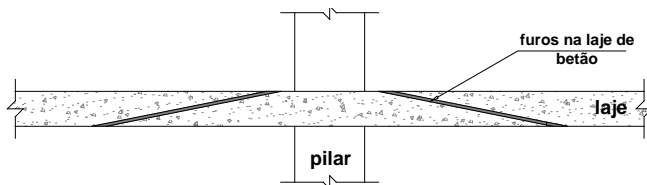


Fig. 9 1ª Etapa do processo construtivo

#### 2-Montagem dos desviadores e dos cordões de aço de alta resistência (Fig. 10)

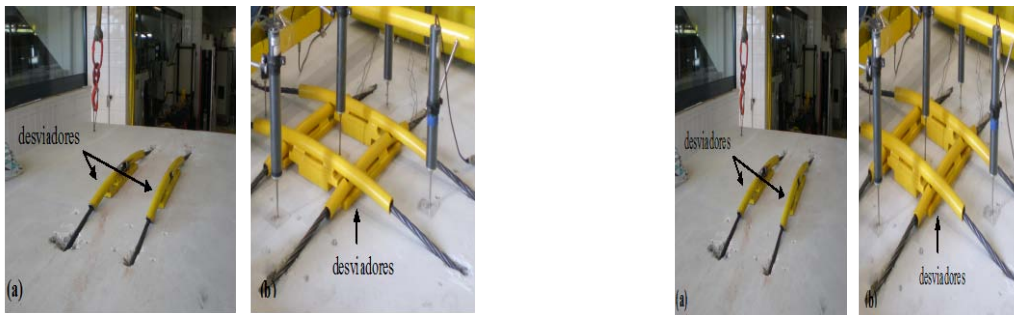
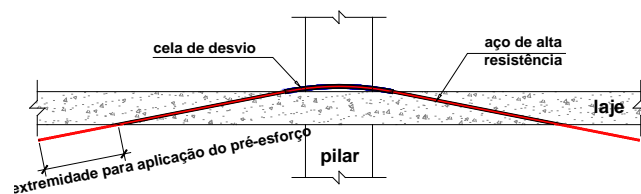


Fig. 10 2ª Etapa do processo construtivo

#### 3-Tensionamento dos cordões (Fig. 11)

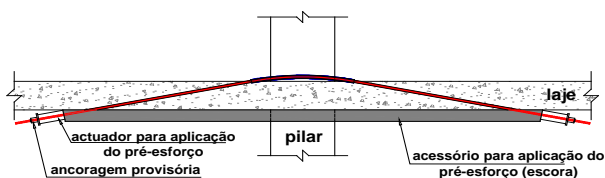


Fig. 11 3ª Etapa do processo construtivo

4-Injecção com agente de aderência (Fig. 12)

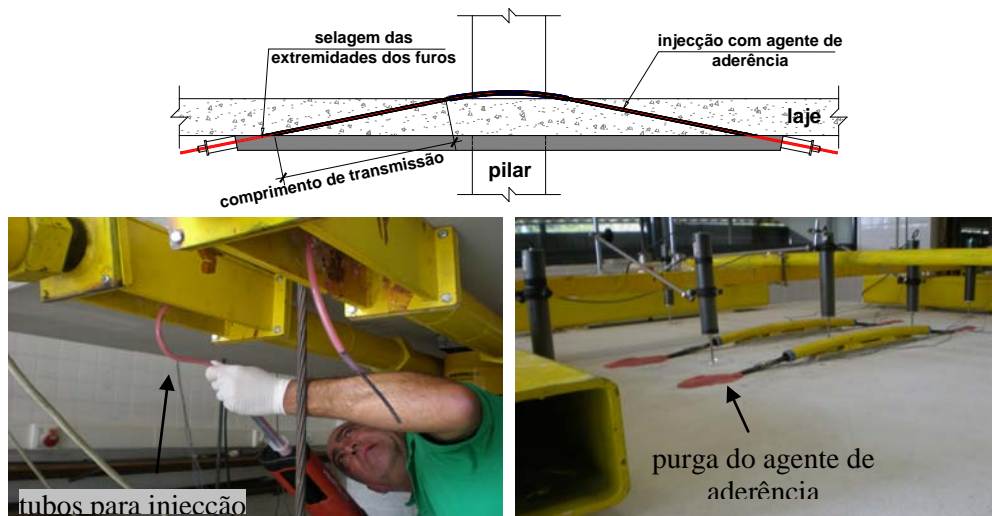


Fig. 12 4ª Etapa do processo construtivo

5-transmissão da força de pré-esforço (Fig. 13)

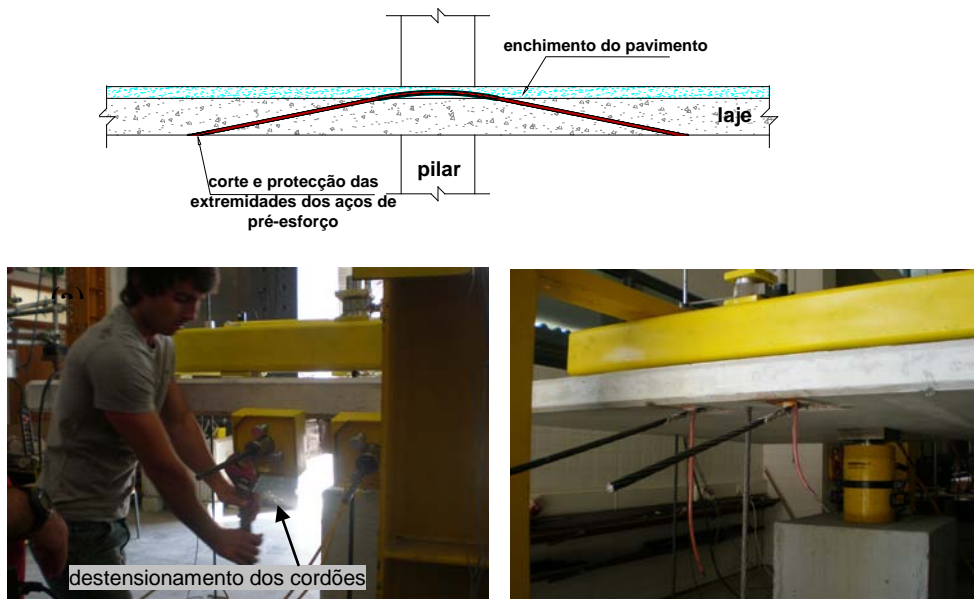


Fig. 13 5ª Etapa do processo construtivo

**3.3.2 Investigação Experimental**

Foram ensaiados sete modelos experimentais de lajes fungiformes com 2300x2300 mm<sup>2</sup> em planta e com espessuras de 100 mm e 120 mm. (Fig. 14).

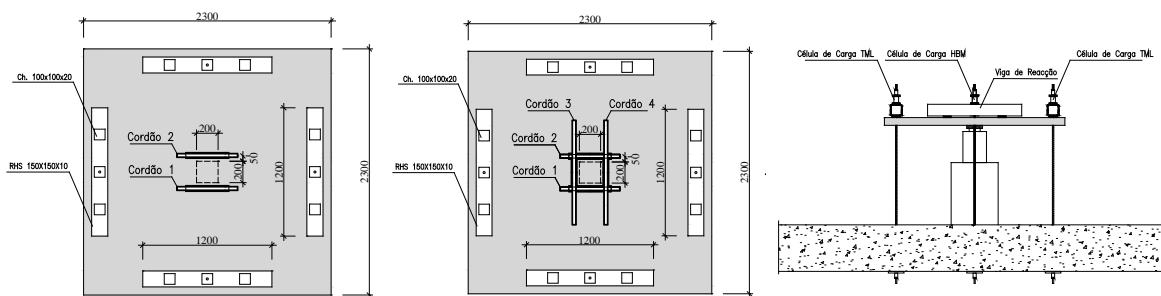


Fig. 14 Geometria dos modelos ensaiados

Em todos os modelos foi atingida uma rotura por punção, caracterizada por ser de carácter repentino. Na Fig. 25 pode-se observar o aspecto das lajes após rotura por punção.



Fig. 15 Aspeto da rotura por punção

Os resultados experimentais mostraram que foi possível diminuir significativamente as deformações e as extensões nas armaduras longitudinais tracionadas e foi possível atingir um aumento da capacidade de carga máxima na ordem dos 54%.

Os resultados foram comparados com o EC2 [20] e com o MC2010 [21] tendo-se obtido uma relação média entre a carga de rotura experimental e a carga prevista de 0.96 e 1.15, respectivamente, para o EC2 e para o MC2010. Importa referir que o MC2010 permite estimar as rotações dos modelos com uma boa aproximação, tendo-se obtido uma relação média entre a rotação registada e a prevista de 1.02 com um COV de 0.15.

Posteriormente, os modelos de lajes foram solicitados em regime de pós-rotura, tendo-se verificado que os modelos tiveram a capacidade de desenvolver alguma resistência (Figs. 16 e 17).

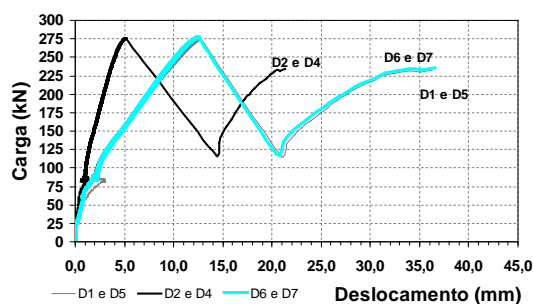


Fig. 16 Comportamento na fase pós-rotura por punção



Os resultados obtidos relativamente à fase de pós-rotura mostra que a adoção do sistema aqui proposto permitiria evitar uma rotura semelhante à ocorrida em situações anteriores [1-4].



Fig. 17 Aspecto de um modelo após atingir carga máxima de pós-rotura por punçoamento

## Agradecimentos

Estes trabalhos tiveram o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia - Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior através de uma bolsa de doutoramento número SFRH/BD/37538/2007 e do Projecto PTDC/ECM/114492/2009. Gostaríamos também de agradecer à Concremat pela execução dos modelos em betão armado, à HILTI Portugal pelo adesivo HIT RE-500 e pelo equipamento de furação e à VSL pelos cordões de pré-esforço.

## Referências

- [1] Delatte, Norbert J. *Beyond failure: forensic case studies for civil engineers*. Berlin: ASCE Press; 2009.
- [2] Gardner NJ, Jungsuck Huh, Chung Lan. Lessons from the Sampoong Department store collapse. *Cem Concr Compos* 2002;24(6):523–9.
- [3] Ruiz MF, Muttoni A, AndKunz J. Strengthening of flat slabs against punching shear using post-installed shear reinforcement. *ACI Struct J* 2010;107(4): 434–42.
- [4] Wood J. *Pipers row car park, Wolverhampton. Quantitative study of the causes of the partial collapse on 20th March 1997*. Health and safety executive report.UK; 2008.
- [5] Cánovas, M.F., —*Patología y Terapéutica del Hormigón Armado*, Colégio de Ingenieros de Caminos, Canales y puertos, 3ª edición, 1994
- [6] Emmons, P.H., —*Concrete Repair and Maintenance Illustrated*, R.S. Means Company Inc, 1994.
- [7] Helene, P., *Manual Para Reparo, Reforço e Protecção de Estruturas de Concreto*, PINI, 1992.
- [8] Souza, V.C.M. e Ripper, T., *Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto*, PINI, 1998
- [9] Federation Internationale de la Précontrainte, —*Repair and Strengthening of Concrete Structures*, FIP Guide to Good Practice, Thomas Telford, Londres, 1991.
- [10] Comité Euro-International du Béton, —*Assessment of Concrete Structures and Design Procedures for Upgrading (redesign)*, Bulletin d'Information n° 162, 1983.
- [11] Ramos, A. M.: *Reparação e Reforço de Lajes Fungiformes ao Punçoamento*, Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 1995.
- [12] Duarte, I.: *Comportamento ao Punçoamento de Lajes Fungiformes Reforçadas com Parafusos*, Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2008.
- [13] Luís, M.: *Punçoamento Cíclico de Lajes Fungiformes Reforçadas com Pré-Esforço Transversal*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2010.
- [14] Inácio, M.: *Comportamento ao Punçoamento de Lajes Fungiformes Reforçadas com Parafusos – Efeito da Área e Posicionamento da Ancoragem*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2010.
- [15] Gomes, J.: *Efeito da Aderência na Resistência ao Punçoamento de Lajes Fungiformes Reforçadas com Parafusos Transversais*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2010.

- 
- [16] Faria, D.M.V., Lúcio, V.J.G, and Ramos, A.M.P. Strengthening of Reinforced Concrete Flat Slabs using Post-Tensioning with Anchorages by Bonding. *fib Symposium - Concrete: 21st Century Superhero*, London, Junho, 2009.
- [17] Faria DMV, Lúcio VJG, Ramos AMP. Strengthening of flat slabs with post-tensioning using anchorages by bonding. *aceite para publicação em Eng Struct.*, 2011
- [18] Faria, D.M.V., Lúcio, V.J.G, and Ramos, A.M.P. Pull-Out and Push-In Tests of Bonded Steel Strands. Magazine of Concrete Research, *MACR-D-10-00068*, *aceite para publicação*, 2010.
- [19] Faria, D.M.V., Lúcio, V.J.G, and Ramos, A.M.P. Bond Behaviour of Prestress Steel Strands Bonded With an Epoxy Adhesive and a Cement Grout for Flat Slab Strengthening Purposes – Experimental Study. *3rd fib International Congress, Washington*, Maio-Junho, 2010.
- [20] Instituto Português da Qualidade, *NP EN 1992-1-1 Eurocódigo 2: Projecto de Estruturas de Betão – Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*, 2010.
- [21] Federation International du Beton. *Model Code 2010, First Complete Draft*, *fib Bulletins N° 55 and 56*, 2010.