

Comportamento pós-rotura de lajes fungiformes pré-esforçadas

Post-failure behaviour of prestressed concrete flat slabs

António Pinho Ramos
Válter Lúcio

Resumo

Neste trabalho é apresentada a campanha experimental efectuada para estudar o comportamento pós-rotura ao punçoamento de lajes fungiformes pré-esforçadas.

São apresentados os resultados experimentais de seis modelos à escala reduzida de lajes fungiformes maciças, ensaiadas numa primeira fase à rotura por punçoamento. Após esta primeira fase, os modelos experimentais foram novamente carregados para estudo da influência do pré-esforço no comportamento pós-rotura, designadamente, da distância dos cordões de pré-esforço ao pilar e da quantidade de armadura de pré-esforço.

Os resultados experimentais obtidos são comparados com os valores previstos, nomeadamente, pelas Recomendações da FIP (1998) para o Dimensionamento de Lajes Fungiformes Pré-Esforçadas.

Abstract

Progressive collapse of structures generally results on the loss of human lives. Experience shows that flat slab structures are very sensitive to progressive collapse, which may cause large accidents, unless special detailing is provided. The post failure behaviour of the slab under punching is decisive for the progressive collapse development. This work presents the experimental research carried out to study the post failure behaviour of prestressed concrete flat slabs.

Six reduced scale prestressed concrete flat slabs models were tested. The tests were carried out in two different phases. In the first one the models were loaded up to failure by punching. Afterwards the models were loaded again to study the post failure behaviour changes caused by the presence of unbonded prestressed tendons and the influences of their distance to the column.

The experimental results were compared with the FIP Recommendations (1998) for the Design of Post-Tensioned Slabs and Foundation Rafts.

António Pinho Ramos

Professor Auxiliar
DEC/FCT/UNL
Monte de Caparica

Válter Lúcio

Professor Associado
DEC/FCT/UNL
Monte de Caparica

1 Introdução

A rotura ao punçoamento numa laje fungiforme é do tipo frágil e sem qualquer ductilidade. Embora se trate de um mecanismo de rotura local, pode dar origem a uma rotura progressiva e ao colapso total duma estrutura, pelo simples facto de que a perda de um ponto de apoio aumenta os esforços transmitidos aos apoios vizinhos. Nos últimos anos tem havido alguns exemplos de colapsos progressivos deste tipo de estruturas que originam, em geral, perdas materiais e humanas importantes.

Sempre que possível deverão ser utilizadas pormenorizações, tanto da armadura passiva como da activa, que permitam um melhor comportamento pós-rotura deste tipo de estruturas. Exemplos deste procedimento são a utilização de varões de armadura ordinária colocados junto à face inferior da laje e passando através do pilar, ou ainda, a colocação dos cabos de pré-esforço a passar igualmente sobre os pilares e dentro da armadura longitudinal destes.

De facto, a colocação de varões junto à face inferior da laje, passando ou amarrando no pilar, conduz a um melhor comportamento pós-rotura deste tipo de ligação. Após ter ocorrido uma rotura por punçoamento, a armadura superior ordinária, que não seja cintada pela armadura de punçoamento, tem somente uma pequena contribuição para a resistência pós-rotura, visto que facilmente se dá o arrancamento do recobrimento desta armadura (ver Figura 1a), deixando esta de ser eficiente. Pelo contrário, a armadura inferior que está mais profundamente embebida no betão, não fica sujeita a esse mecanismo de arrancamento. Inicialmente, a resistência desta armadura dar-se-á por efeito de ferrolho (Figura 1b) e para deformações maiores por dobragem das armaduras (Figura 1c). A transformação posterior num mecanismo de membrana como o esquematizado na Figura 1d poderá ser possível, mas é improvável.

Vários autores estudaram experimentalmente o efeito, no comportamento pós-rotura ao punçoamento de lajes fungiformes, de varões colocados junto à face inferior destas e passando através do pilar. Estes ensaios revelaram uma resistência residual considerável após a rotura por punçoamento.

Com base em resultados experimentais, Regan (1980) propôs para cálculo da armadura de pós-rotura a seguinte equação, baseada na resistência por efeito de ferrolho dada pela expressão de Rasmussen (1963):

$$V_{PR} = 1,3 \sum \phi_s^2 \sqrt{f_{sy} f_{cm}} \quad (1)$$

em que V_{PR} é o valor da carga de pós-rotura ao punçoamento, ϕ_s é o diâmetro dos varões, f_{sy} é a tensão de cedência ou tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2% do aço e f_{cm} é a tensão média de rotura à compressão do betão em provetes cilíndricos. Este somatório é estendido a todos os varões bem amarrados que passem no pilar (um varão que atravesse o pilar e se encontre amarrado na laje nas suas duas extremidades é contabilizado duas vezes).

A rotura ao punçoamento numa laje fungiforme é do tipo frágil e sem qualquer ductilidade. Embora se trate de um mecanismo de rotura local, pode dar origem a uma rotura progressiva e ao colapso total duma estrutura, pelo simples facto de que a perda de um ponto de apoio aumenta os esforços transmitidos aos apoios vizinhos. Nos últimos anos tem havido alguns exemplos de colapsos progressivos deste tipo de estruturas que originam, em geral, perdas materiais e humanas importantes.

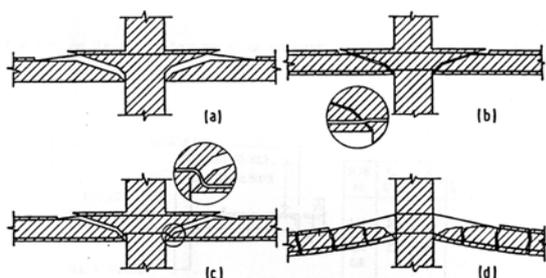


Figura 1 Comportamento pós-rotura de uma ligação pilar-laje fungiforme – Regan e Braestrup (1985)

Como já atrás referido, resistências pós-rotura relativamente elevadas são também possíveis em lajes fungiformes pré-esforçadas, nas quais os cabos de pré-esforço inclinados atravessam os pilares.

Ensaio experimentais realizados por Pralong *et al.* (1979) confirmam esta observação. Os referidos autores constataram que nos modelos em que utilizaram armadura de pré-esforço, a perda de capacidade de sustentação após a rotura por punçoamento foi menor, sendo até possível incrementar o valor da carga vertical aplicada. Foi ainda possível obter maiores deformações antes do colapso total da estrutura.

No único modelo com pré-esforço aderente o comportamento pós-rotura ao punçoamento foi melhor do que o daqueles em que o pré-esforço era não aderente, tendo-se atingido naquele caso um valor superior para a carga de pós-rotura, embora com deformações da mesma ordem de grandeza.

O Model Code 1990 (MC90) (1993) apresenta disposições para reduzir o risco de colapso progressivo, na hipótese de ocorrência de uma rotura local numa ligação pilar-laje fungiforme não pré-

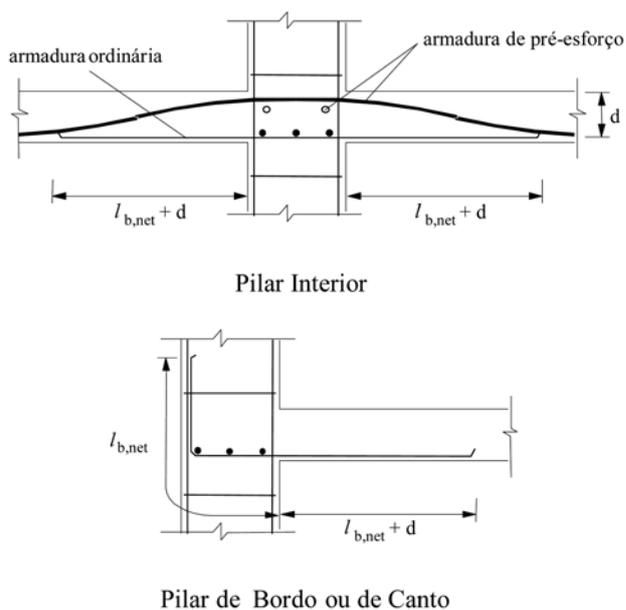


Figura 2 Armadura de colapso progressivo

-esforçada, especificando que nestas circunstâncias a seguinte equação deve ser verificada:

$$V_{Sd} \leq A_s f_{syd} \quad (2)$$

Nesta expressão V_{Sd} é o valor de cálculo da força de punçoamento actuante, A_s a área de armadura ordinária e f_{syd} o valor de cálculo da tensão de cedência do aço. A equação (2) foi deduzida admitindo que o cálculo do V_{Sd} será feito para a combinação fundamental de acções, quando na realidade uma verificação deste tipo deveria ser feita para uma combinação accidental de acções.

Recomendações posteriores editadas pela FIP (1998) generalizam estas disposições a lajes fungiformes pré-esforçadas. Neste documento e na eventualidade de ocorrência de uma rotura local ao punçoamento, para reduzir o risco de uma rotura progressiva da estrutura, deverá verificar-se a seguinte equação:

$$V_{Sd} \leq A_s f_{syd} + A_{sp} \frac{f_{puk}}{\gamma_s} \quad (3)$$

Em que, A_{sp} é a área de armadura de pré-esforço, f_{puk} a tensão característica de rotura à tracção do aço de pré-esforço e γ_s é o coeficiente de segurança do aço, considerado igual a 1,15. Os varões e os cabos de pré-esforço considerados no cálculo de A_s e A_{sp} , respectivamente, deverão passar dentro da armadura longitudinal do pilar. A armadura não pré-esforçada (A_s) deverá ser colocada junto à face inferior da laje e com uma amarração no mínimo igual ao comprimento de amarração ($l_{b,net}$) mais a altura útil da laje, ou o comprimento de amarração se esta se fizer dentro do pilar (ver Figura 2).

A armadura de pré-esforço poderá ser colocada junto à face superior da laje, mas deverá ter um traçado que a conduza para junto da face

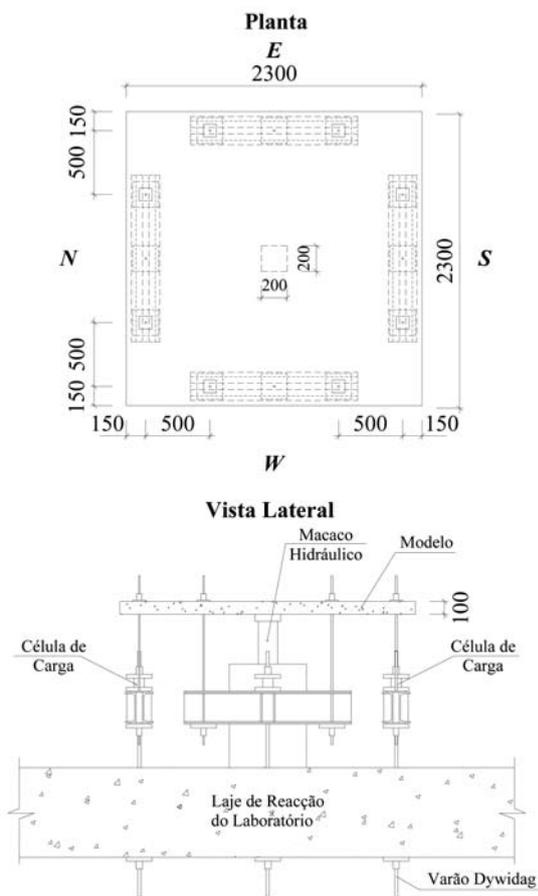


Figura 3 Geometria dos modelos e sistema de aplicação da carga vertical

inferior à medida que se caminha para o meio vão. Na eventualidade de se utilizarem cabos de pré-esforço não aderentes, deverá prever-se a existência de ancoragens intermédias em média em cada dois vãos, de forma a reduzir o risco de rotura progressiva nos cabos.

2 Análise experimental

Com o objectivo de averiguar o comportamento pós-rotura deste tipo de estruturas procedeu-se ao ensaio de seis modelos de lajes fungiforme à escala reduzida. Tinha-se como finalidade o estudo da influência no comportamento pós-rotura da armadura de pré-esforço, nomeadamente, o efeito da sua distância ao pilar e da intensidade do valor do pré-esforço aplicado. Os ensaios apresentados neste trabalho fazem parte de um conjunto mais vasto, que deu origem a uma tese de Doutoramento em Engenharia Civil – Ramos (2003).

Os modelos utilizados pretendiam simular exclusivamente a área de laje junto ao pilar, limitada pelas linhas de inflexão da curvatura, onde os momentos flectores são nulos. Estes consistiam em painéis quadrados de laje em betão armado. As dimensões em planta eram de 2300 x 2300 mm², tendo 100 mm de espessura (Figura 3). O pilar central foi simulado por uma placa de aço com 200 x 200 mm².

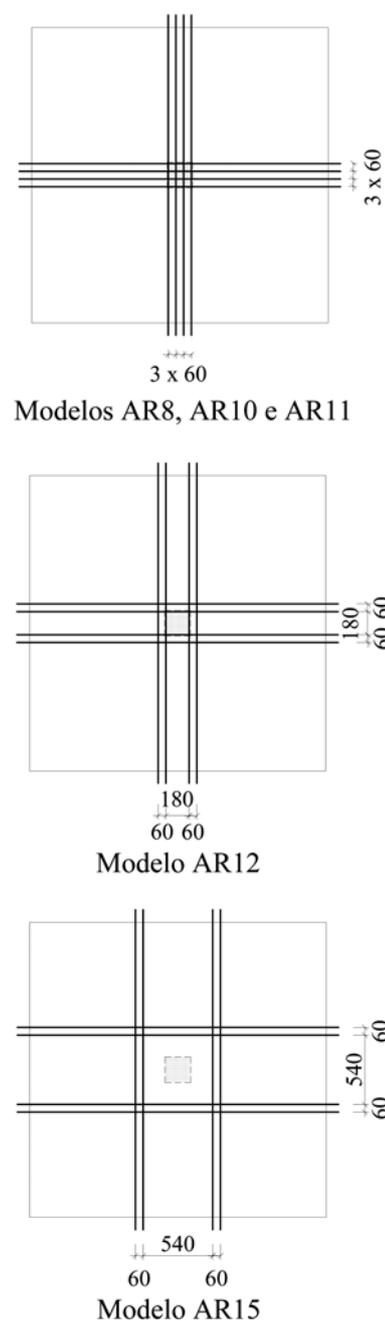


Figura 4 Traçado em planta dos monocórdões de pré-esforço nos modelos ensaiados à pós-rotura

As armaduras superiores de flexão eram constituídas por trinta e nove varões de 10 mm de diâmetro em cada direcção, o que corresponde a aproximadamente uma malha quadrada de $\phi 10//0,06$, enquanto que as armaduras inferiores de flexão eram constituídas por 12 varões de 6 mm de diâmetro em cada direcção, ou seja aproximadamente uma malha quadrada de $\phi 6//0,20$.

Como armadura de pré-esforço foram utilizados em todos os modelos quatro monocordões não aderentes em cada direcção, com excepção do modelo AR9 que não continha armadura de pré-esforço. Na Figura 4 pode ser observada a disposição em planta dos monocordões de pré-esforço em todos os modelos ensaiados à pós-rotura. O traçado transversal destes monocordões era sensivelmente trapezoidal, com uma força de desvio devida ao pré-esforço de cima para baixo sobre o pilar e outras, de baixo para cima, distanciadas 1,0 m do centro do pilar.

Para caracterização dos materiais constituintes dos modelos foram ensaiados o betão, os varões da armadura ordinária e os cordões de pré-esforço. No quadro seguinte são apresentadas a tensão média de rotura à compressão do betão em provetes cúbicos (f_{cm}), a tensão de cedência ou tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2% do aço da armadura ordinária (f_{sy}) e a tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2% do aço de pré-esforço ($f_{p0,2}$).

Quadro 1 Caracterização das propriedades dos materiais

Modelo	Betão	Armadura ordinária f_{sy} (MPa)		Armadura de pré-esf.
	f_{cm} (MPa)	Ø6	Ø10	$f_{p0,2}$ (MPa)
AR8	52,0	555	481	1855
AR9	46,4			
AR10	51,8			
AR11	47,5			
AR12	39,1			
AR15	39,6	583	690	

A carga vertical foi aplicada através de um macaco hidráulico ENERPAC RCH606 de 576 kN de capacidade máxima e 153 mm de curso máximo, por intermédio de uma placa de aço colocada no

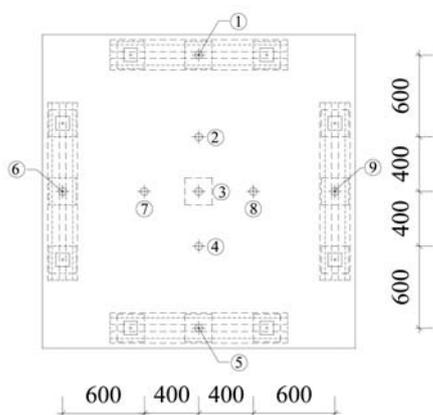


Figura 5 Localização dos deflectómetros (LVDT)

centro do modelo. Para controlo e aplicação da pressão hidráulica ao macaco, utilizou-se uma unidade de controlo de pressão hidráulica da WALTER + BAI AG modelo PKNS 19-DH.

Os deslocamentos verticais foram impedidos em oito pontos junto aos bordos do modelo, através da utilização de oito cordões de aço de alta resistência com diâmetro de 0,6" (ver Figura 3). Em cada um desses pontos foi colocada uma placa de aço com dimensões de 100 x 100 x 20 mm³, que servia de placa de ancoragem aos cordões. Estes cordões atravessavam o modelo e suspendiam, dois a dois, vigas metálicas, no centro das quais foram colocados varões Dywidag, que ancoravam na laje de reacção do laboratório e impediam os deslocamentos verticais no bordo do modelo.

Os ensaios foram realizados em duas fases distintas. Numa primeira fase a carga vertical foi incrementada até à rotura por punçoamento, procedendo-se em seguida à descarga do modelo. Em seguida, aplicava-se novamente uma carga vertical em patamares crescentes, até ao ponto em que os danos provocados nos modelos não permitiam a continuação do ensaio.

Ao longo do ensaio procedeu-se ao registo do valor da força instalada nos monocordões de pré-esforço, da carga vertical aplicada e dos deslocamentos verticais em nove pontos dos modelos (Figura 5). Todos os instrumentos de medição utilizados encontravam-se ligados a um aquisidor de dados HBM UPM 100.

3 Análise dos resultados

3.1 Deslocamentos verticais

Os nove deflectómetros eléctricos utilizados permitiram determinar os deslocamentos verticais relativos em relação ao pilar central (deflectómetro 3) de oito pontos da laje. Com os resultados recolhidos foram elaboradas as Figuras 6 e 7. Nestas figuras procede-se à comparação dos valores dos deslocamentos verticais observados na fase de ensaio ao punçoamento, com os registados na fase de pós-rotura. No modelo AR9 não foram recolhidos os dados relativos à direcção E-W devido a avaria no equipamento de recolha de dados.

Para uma maior clareza de leitura, optou-se por apresentar curvas com o valor médio dos valores registados nos deflectómetros

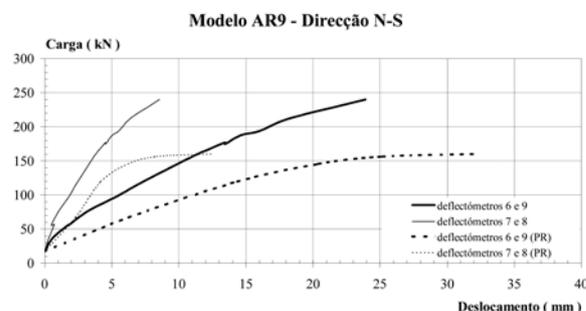


Figura 6 Evolução dos deslocamentos verticais no modelo AR9 (fases de punçoamento e pós-rotura)

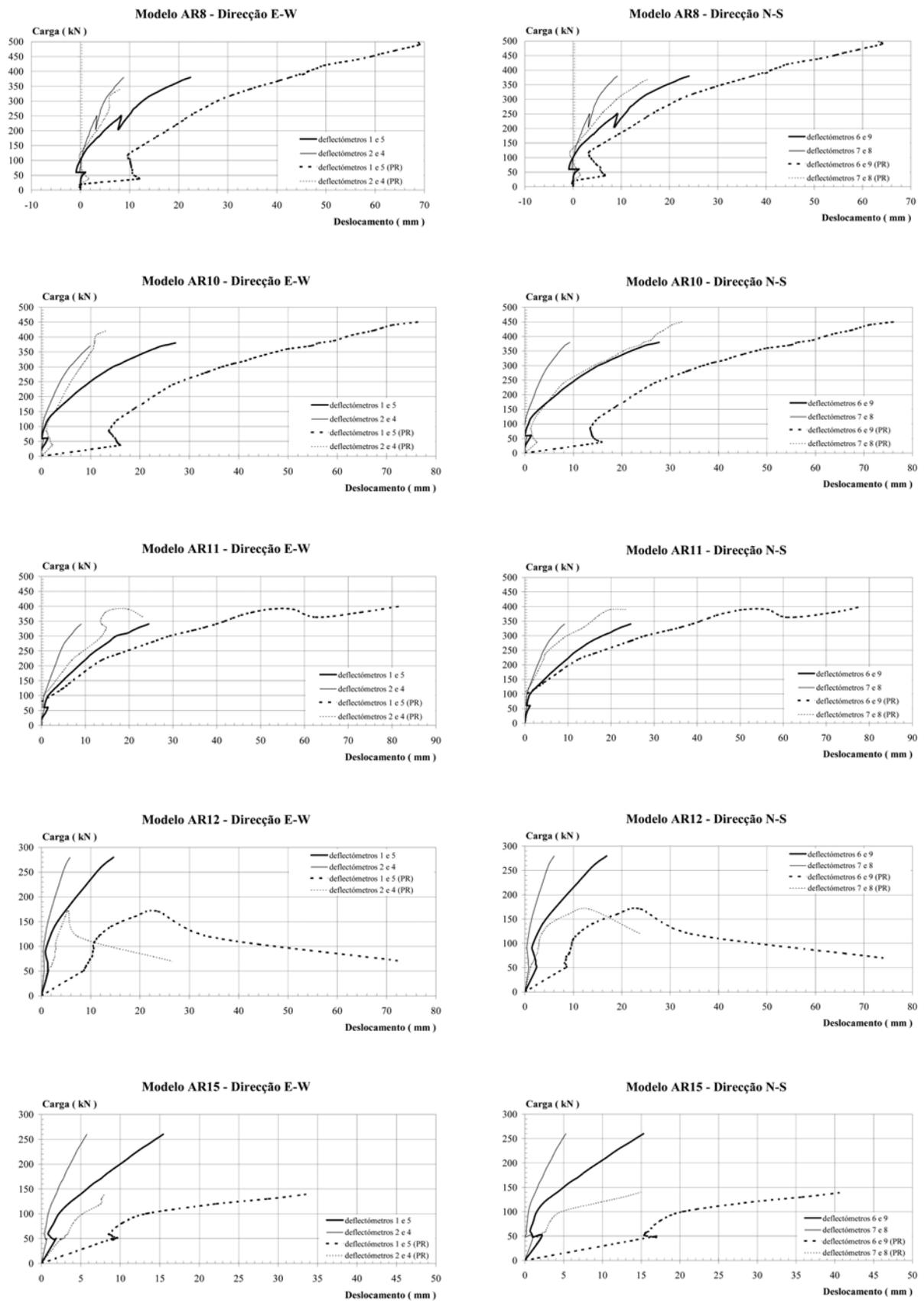


Figura 7 Evolução dos deslocamentos verticais nos modelos AR8, AR10, AR11, AR12 e AR15 (fases de punçoamento e pós-rotura)

diametralmente opostos (deflectómetros 1 e 5 e deflectómetros 2 e 4, na direcção E-W; deflectómetros 6 e 9 e deflectómetros 7 e 8, na direcção N-S). As curvas apresentadas a traço contínuo correspondem ao ensaio ao punçoamento, enquanto que as apresentadas a traço interrompido são as correspondentes ao ensaio à pós-rotura (séries identificadas com a sigla PR).

O ensaio à pós-rotura conduziu em todos os modelos considerados a maiores deslocamentos verticais, quando comparados com os registados durante o ensaio ao punçoamento. Nos modelos em que se aplicou pré-esforço, observa-se um decréscimo do deslocamento vertical durante a operação de pré-esforço, à semelhança do que aconteceu nos ensaios ao punçoamento.

Na fase de ensaio à pós-rotura, nos modelos em que os monocordões de pré-esforço foram concentrados sobre o pilar (modelos AR8, AR10 e AR11), os deslocamentos correspondentes à máxima carga aplicada foram claramente superiores aos verificados nos restantes modelos (AR9, AR12 e AR15). Nos modelos AR8, AR10 e AR11, a estes maiores deslocamentos verticais estão também associadas cargas verticais aplicadas superiores às dos restantes modelos.

No ensaio de pós-rotura do modelo AR11 é possível observar um patamar horizontal nos gráficos deslocamento-carga, correspondente a um aumento da deformação sem incremento da carga vertical aplicada, antecedendo o colapso da estrutura. O mesmo fenómeno está registado nos gráficos correspondentes ao ensaio do modelo AR12, em que, apesar da diminuição da carga vertical aplicada por perda de sustentação do modelo, os deslocamentos verticais aumentam bruscamente antes do colapso da estrutura. Nos restantes modelos o comportamento observado foi idêntico, não tendo sido possível, no entanto, o registo dos deslocamentos correspondentes devido ao facto de estes terem excedido a capacidade de leitura dos deflectómetros utilizados.

3.2 Cargas máximas de pós-rotura

Nos ensaios à pós-rotura os modelos foram submetidos a carregamento vertical até se atingir o colapso da laje. Em todos os modelos ensaiados houve destacamento do recobrimento dos varões da armadura longitudinal superior, em especial daqueles que se encontravam mais próximos do pilar e da face superior da laje (Figura 8).

No modelo em que não se utilizou armadura de pré-esforço (AR9) o fenómeno atrás descrito levou à perda da capacidade de sustentação da laje, não tendo sido possível continuar a aplicação da carga vertical. Neste caso foi alcançado um valor máximo de 160 kN para a carga aplicada. Este valor é cerca de 64% do valor experimental de rotura ao punçoamento.

De referir que não foi colocada armadura ordinária inferior a passar dentro do pilar em nenhum dos modelos. Evidentemente que a eventual colocação de armadura ordinária junto à face inferior das lajes, e a passar dentro do pilar, conduziria a um melhor comportamento da estrutura na fase de pós-rotura.

Fenómeno idêntico ao descrito sucedeu nos modelos AR12 e AR15. Embora se tenha utilizado armadura de pré-esforço nestes modelos, esta não foi eficiente na fase de pós-rotura. No modelo AR15 os

monocordões de pré-esforço não passavam sobre o pilar enquanto que no modelo AR12 somente dois monocordões em cada direcção passavam sobre o pilar, mas junto ao bordo deste (ver Figura 4). Com o aumento do carregamento vertical verificou-se o deslizamento horizontal destes monocordões, perdendo assim a sua eficácia.

Nestes casos, a carga vertical máxima aplicada na fase de pós-rotura foi de 180 kN no modelo AR12 e de 140 kN no modelo AR15, ou seja, cerca de 64% e 53% da carga de rotura experimental ao punçoamento, respectivamente.

Os modelos em que os monocordões de pré-esforço foram concentrados sobre o pilar (AR8, AR10 e AR11) revelaram um melhor comportamento pós-rotura. Registou-se igualmente destacamento do recobrimento da armadura longitudinal superior, mas com menor intensidade do que nos modelos anteriores. Obtiveram-se cargas verticais máximas na fase de pós-rotura claramente superiores às alcançadas nos modelos AR9, AR12 e AR15. As cargas de pós-rotura obtidas são ainda superiores às respectivas cargas de rotura experimental ao punçoamento.

No modelo AR8 registou-se uma rotura por esforço transversal junto a um dos bordos da laje (ver Figura 9). Esta rotura deu-se junto ao ponto de inflexão dos monocordões de pré-esforço, que se situava a 150 mm desse bordo, e deveu-se à força de desvio desses monocordões.

Nos outros dois modelos (AR10 e AR11) o carregamento vertical foi interrompido por se registarem elevadas deformações dos modelos, tendo-se atingido o fim de curso do macaco hidráulico utilizado para aplicação da carga. No entanto, quer um quer outro modelo, apresentavam já sinais de não poderem suportar mais carga.

Os danos provocados nos modelos durante os ensaios de pós-rotura foram claramente mais severos do que os observados nos ensaios ao punçoamento. A este facto estão associadas as maiores deformações registadas nesta fase. Nas figuras seguinte é possível observar a face inferior do modelo AR11 após o ensaio ao punçoamento e após o ensaio de pós-rotura, e ainda, a face superior do modelo AR15 nas mesmas situações.

No Quadro 2 são apresentados os valores da carga de rotura experimental nos ensaios ao punçoamento (V_{exp}) e os da carga máxima alcançada na fase de pós-rotura ($V_{PR,exp}$), além da razão entre estes dois valores.

Quadro 2 Comparação entre os valores da carga de rotura experimental ao punçoamento e os da carga máxima de pós-rotura

Modelo	V_{exp} (kN)	$V_{PR,exp}$ (kN)	$V_{PR,exp} / V_{exp}$
AR8	380	500	1,32
AR9	251	160	0,64
AR10	371	470	1,27
AR11	342	400	1,17
AR12	280	180	0,64
AR15	262	140	0,53



Figura 8 Aspecto da face superior dos modelos com destacamento do recobrimento da armadura longitudinal superior



Figura 9 Rotura por esforço transversal junto a um dos bordos do modelo AR8

Como já tinha sido referido, verifica-se que foram atingidos valores da carga de pós-rotura superiores aos valores da carga de rotura experimental ao punção, nos modelos em que os monocórdões de pré-esforço foram colocados sobre o pilar (AR8, AR10 e AR11). Nos restantes modelos os valores da carga de pós-rotura foram claramente inferiores aos atingidos nos ensaios iniciais ao punção. A colocação de cabos de pré-esforço a passar dentro do pilar é pois uma solução eficaz na prevenção do colapso após rotura por punção deste tipo de estruturas.



Figura 10 Face inferior do modelo AR11 após ensaios ao punção e à pós-rotura



Figura 11 Face superior do modelo AR15 após ensaios ao punção e à pós-rotura

3.3. Comparação entre os resultados experimentais e os valores previstos para a carga de pós-rotura ao punçoamento

Foi utilizada a expressão de Rasmussen (1963) (Expressão 1) e a proposta nas "Recommendations for the Design of Post-Tensioned Slabs and Foundation Rafts" (Expressão 3) para cálculo do valor previsto para a carga de pós-rotura ao punçoamento (V_{PR}). Nesta última, e para ter em conta a não consideração de coeficientes parciais de segurança, a utilização dos valores médios para as características dos materiais e ainda o facto desta expressão ter sido deduzida para aplicação com a combinação fundamental de acções e não com a accidental, o valor obtido através da expressão 3 foi multiplicado por um coeficiente de 0,44, como recomendado por Melo e Regan (1998). No Quadro III apresentam-se os resultados obtidos comparando-os com os resultados experimentais. Nos modelos AR8, AR10 e AR11 foram considerados como eficientes dois monocórdões de pré-esforço em cada direcção ortogonal. Nos cálculos efectuados com recurso à expressão de Rasmussen foi utilizado um diâmetro equivalente que conduziu a igual valor para a área transversal dos monocórdões.

Quadro 3 Comparação entre os valores da carga de pós-rotura ao punçoamento experimental e prevista

Modelo	$V_{PR,exp}$ (kN)	Expressão de Rasmussen (1)		Recomendações FIP (3)	
		V_{PR} (kN)	$V_{PR,exp} / V_{PR}$	V_{PR} (kN)	$V_{PR,exp} / V_{PR}$
AR8	500	368	1,36	702	0,71
AR10	470	367	1,28	702	0,67
AR11	400	351	1,14	702	0,57

A aplicação da expressão de Rasmussen a estes modelos conduziu a valores conservadores. A razão $V_{PR,exp}/V_{PR}$ média neste conjunto de ensaios é de 1,26.

A aplicação da expressão preconizada pelas recomendações da FIP para o dimensionamento de lajes fungiformes pré-esforçadas conduziu a valores claramente contra a segurança. A expressão referida parte do pressuposto que na fase de pós-rotura se formará um mecanismo em que a laje fica suspensa pela armadura de pós-rotura. Esta armadura é constituída pela armadura de pré-esforço e pela armadura ordinária colocada junto à face inferior da laje e bem amarrada nesta, colocadas a passar no interior da armadura longitudinal do pilar. Nos ensaios realizados nunca foi visualizado um mecanismo deste tipo, sendo improvável a sua formação na generalidade dos casos. Nos modelos analisados, a resistência experimental na fase de pós-rotura foi em média cerca de 65% do valor previsto para a carga de pós-rotura ao punçoamento, calculada segundo as recomendações da FIP referidas.

4 Observações finais

Na hipótese de ocorrência de uma rotura local ao punçoamento numa laje fungiforme, esta será do tipo frágil, dando lugar a uma

substancial perda de sustentação da laje junto ao pilar. Esta rotura local irá provocar um incremento da carga, e da excentricidade desta, nas ligações laje-pilar adjacentes. Este facto poderá originar um colapso total da laje em questão, ou ainda, um colapso progressivo de toda a estrutura, na medida que a queda de uma laje poderá provocar o colapso da laje inferior, e assim sucessivamente.

Os resultados experimentais apresentados neste trabalho indiciam que em lajes fungiformes pré-esforçadas, a existência de cabos de pré-esforço colocados sobre o pilar levam a um incremento substancial da resistência pós-rotura deste tipo de estruturas.

De facto, nos modelos ensaiados em que os monocórdões de pré-esforço foram colocados sobre o pilar, obtiveram-se elevados valores da carga de pós-rotura. Estes foram em média superiores em cerca de 25% aos valores obtidos para a carga de rotura experimental por punçoamento. Associados a estes valores elevados da resistência na fase de pós-rotura, obtiveram-se deformações correspondentes à carga máxima de pós-rotura bastante superiores às dos modelos em que ou não havia armadura de pré-esforço, ou esta estava colocada fora do pilar.

Nos modelos em que os monocórdões de pré-esforço não foram colocados a passar sobre o pilar, a resistência à pós-rotura foi bastante inferior à obtida no ensaio ao punçoamento, sendo em média somente cerca de 60% deste valor. O mesmo aconteceu no modelo em que não se utilizou armadura de pré-esforço, no qual a resistência à pós-rotura foi de apenas 64% da carga de rotura experimental ao punçoamento.

Em lajes fungiformes pré-esforçadas é pois recomendável a colocação dos cabos de pré-esforço a passar dentro da armadura longitudinal dos pilares. Com esta disposição, além do aumento da resistência ao punçoamento da laje, obtém-se ainda um incremento da resistência na fase de pós-rotura.

5 Agradecimentos

Os ensaios descritos neste artigo foram realizados no Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura do Instituto Superior Técnico, tendo contado com o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia. A estas instituições agradecemos os meios colocados à disposição.

Manifestamos igualmente reconhecimento às Empresas que deram o seu contributo à realização destes ensaios, nomeadamente: à Concremat, S.A. pela fabricação de alguns dos modelos e à VSL, S.A. pelo fornecimento dos monocórdões de pré-esforço e respectivos sistemas de ancoragem.

6 Referências

- Fédération Internationale de la Précontrainte – *Recommendations for the Design of Post-Tensioned Slabs and Foundation Rafts*, Maio, 1998.
- Regan, P. E.; Braestrup, M. W. – *Punching Shear in Reinforced Concrete – a State of Art Report*, Comité Euro-International du Béton, Bulletin d'information nº 168, Lausanne, Janeiro, 1985.
- Regan, P. E. – *Behaviour of Reinforced Concrete Slabs*, CIRIA Report 89, Construction Industry Research and Information Association, Londres, 1980.

- Rasmussen, B. H. – *Betonindstobte Tvaerbelastede Bolts og Dornes Baereevne*, Bygningsstatiske Meddelelser, 34, Copenhaga, Novembro, 1963, p. 39-55.
- Pralong, J.; Brändli, W.; Thürlimann, B. – *Durchstanzversuche an Stahlbeton und Spannbetonplatten*, Bericht nr. 7305-3, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zurich, Dezembro, 1979.
- Comité Euro-International du Béton – *CEB-FIP Model Code 1990*, Bulletin d'information nº 213-214, Maio, 1993.
- Ramos, A. M. P. – *Punçoamento em Lajes Fungiformes Pré-Esforçadas*, Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Março de 2003.
- Melo, G. S. S. A.; Regan, P. E. – *Post-punching resistance of connections between flat slabs and interior columns*, Magazine of Concrete Research, 50, No. 4, Dezembro de 1998, p. 319-327.