

ESTUDO EXPERIMENTAL DO PUNÇOAMENTO EM LAJES FUNGIFORMES PRÉ-ESFORÇADAS



A. Pinho Ramos
Prof. Auxiliar
Investigador do UNIC
FCT / UNL
Monte de Caparica



V. J. G. Lúcio
Prof. Associado
Investigador do UNIC
FCT / UNL
Monte de Caparica

SUMÁRIO

Apresenta-se neste trabalho uma descrição do estudo experimental de quinze modelos reduzidos de laje fungiforme maciça em betão armado pré-esforçado, realizados com o objectivo de quantificar a resistência ao punçoamento deste tipo de estruturas. São analisados separadamente os diferentes efeitos do pré-esforço na resistência ao punçoamento, designadamente, o efeito da compressão no plano da laje, o efeito da força de desvio vertical e o efeito do afastamento dos cordões de pré-esforço ao pilar.

Os resultados obtidos são comparados com os valores preconizados pelo Eurocódigo 2 e pelo CEB-FIP Model Code de 1990.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de estruturas em laje fungiforme tornou-se habitual nos últimos anos. Este facto deve-se fundamentalmente à simplicidade, economia e rapidez de execução, assim como à flexibilidade de utilização dos espaços construídos. A solução de lajes fungiformes com utilização de pré-esforço é menos frequente, mas permite alcançar uma série de vantagens em relação a soluções não pré-esforçadas. A solução pré-esforçada torna possível vencer maiores vãos ou adoptar soluções mais esbeltas para vãos da mesma ordem de grandeza. Por outro lado, permite uma maior eficiência no controlo da deformação e da fendilhação para as condições de serviço. Ainda pelo facto de serem possíveis soluções mais esbeltas, necessariamente com

menor peso, os efeitos das acções sísmicas são minorados, o que pode ser um factor importante em zonas de elevada sismicidade.

Apesar do seu aspecto simples, uma laje fungiforme tem um complexo sistema resistente aos esforços de flexão e de corte, especialmente na zona de ligação laje-pilar. A resistência ao punçoamento é um factor importante no dimensionamento deste tipo de estruturas, sendo frequentemente o factor condicionante para a escolha da espessura da laje a considerar, ou pelo menos da zona do capitel, se for esta a solução adoptada.

O presente trabalho apresenta a investigação experimental levada a cabo para estudo do comportamento de lajes fungiformes pré-esforçadas sob o efeito de cargas concentradas, com o objectivo de avaliar a sua resistência ao punçoamento, e que culminou com a apresentação de uma tese de Doutoramento [1]. Os ensaios experimentais descritos neste artigo foram desenvolvidos no Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura do Instituto Superior Técnico, tendo contado com o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia.

Optou-se por estudar separadamente o efeito da compressão no plano da laje e o efeito da componente vertical das forças de desvio do pré-esforço, provocadas pela mudança de direcção dos cabos, na resistência ao punçoamento deste tipo de estruturas.

Com este objectivo foram elaborados modelos experimentais em que se aplicou compressão no plano da laje, sem no entanto existir força de desvio sobre o pilar. Noutros modelos fez-se exactamente o inverso, havendo força de desvio vertical devida à mudança de direcção dos cabos de pré-esforço sobre o pilar, mas anulando a compressão no plano da laje.

Nos modelos em que se aplicou compressão no plano da laje (Modelos AR2 a AR7), a intensidade desta foi a principal variável. Foram realizados ensaios com compressão numa só direcção e em duas direcções ortogonais.

Para o estudo do efeito da força de desvio dos cabos de pré-esforço na resistência ao punçoamento, elaboraram-se duas séries distintas de modelos. Numa delas, a principal variável foi a intensidade do pré-esforço aplicado e, por consequência, o valor da força de desvio vertical (Modelos AR8 a AR11 e Modelo AR16). Na outra série de ensaios, a intensidade do pré-esforço foi mantida sensivelmente constante, tendo-se variado a posição em planta dos cabos de pré-esforço em relação ao pilar (Modelos AR12 a AR16).

2. DESCRIÇÃO GERAL DOS MODELOS EXPERIMENTAIS

Os modelos utilizados pretendiam simular exclusivamente a área de laje junto ao pilar, limitada pelas linhas de inflexão da curvatura da laje, onde os momentos flectores são nulos. Os modelos consistiam em painéis quadrados de laje em betão armado. As dimensões em planta foram de 2300x2300 mm², tendo 100 mm de espessura. O pilar centrado foi simulado por uma placa de aço com dimensão transversal de 200x200 mm² e 50 mm de espessura, colocada sobre a cabeça de um macaco hidráulico.

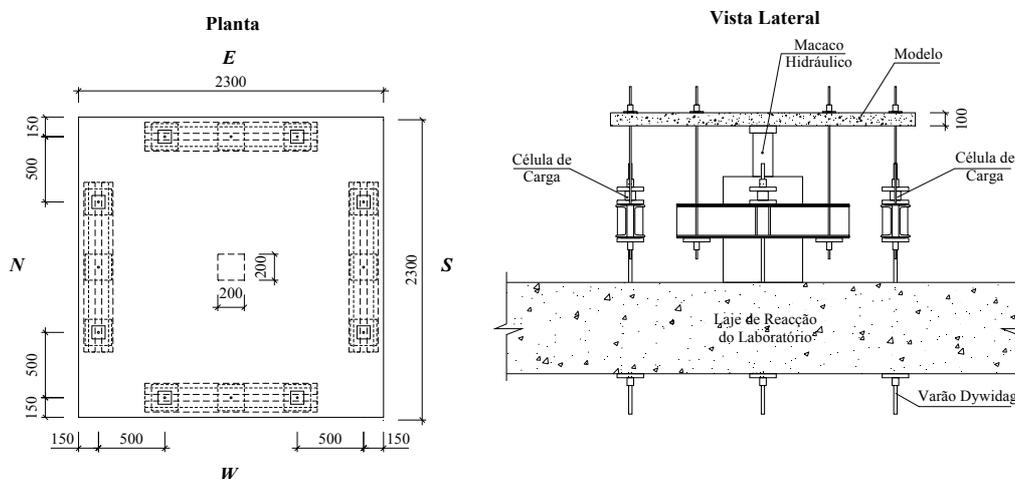


Figura 1 – Geometria dos modelos e sistema de aplicação da carga vertical

A armadura longitudinal superior dos modelos era constituída por trinta e nove varões de 10 mm de diâmetro em cada direcção, o que corresponde a aproximadamente uma malha quadrada de $\phi 10//0.06$. A armadura superior com a maior altura útil é a orientada na direcção E-W. O recobrimento utilizado foi de 10 mm em ambas as faces, o que conduz a uma altura útil média de 80 mm. A armadura longitudinal inferior era constituída por 12 varões de 6 mm de diâmetro em cada direcção, ou seja aproximadamente uma malha quadrada de $\phi 6//0.20$.

2.1 Modelos para estudo do efeito da compressão na resistência ao punçoamento

Foram elaborados seis modelos de laje fungiforme maciça nesta série de ensaios. Ao modelo AR2 não foi aplicado pré-esforço, sendo este um modelo padrão, para permitir comparações entre a resistência ao punçoamento em lajes fungiformes e fungiformes pré-esforçadas. Aos restantes modelos da série foram aplicadas forças de compressão no plano de laje (pré-esforço centrado) através da utilização duma estrutura exterior, constituída por perfis de aço e cordões de pré-esforço. Estes cordões eram depois tracionados, através da utilização de macacos hidráulicos. A força de compressão aplicada era mantida constante no decurso do respectivo ensaio.

Aos modelos AR3 e AR4 foi só aplicada força de compressão no plano da laje na direcção N-S, enquanto que os restantes modelos da série (AR5, AR6 e AR7) foram sujeitos a forças de compressão centrada no plano da laje, nas duas direcções ortogonais.



Figura 2 – Aspecto geral de um ensaio e do sistema de aplicação da compressão

2.2 Modelos para estudo do efeito da força de desvio na resistência ao punçoamento

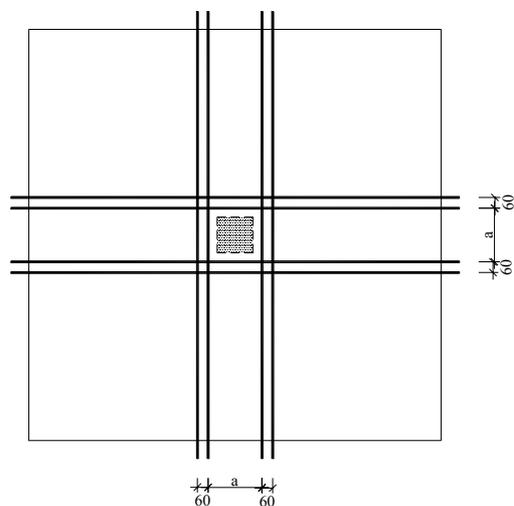
Para estudo do efeito da força de desvio na resistência ao punçoamento foram elaborados nove modelos de laje fungiforme maciça. Como armadura de pré-esforço foram utilizados em todos os modelos quatro monocordões não aderentes em cada direcção, com excepção do modelo AR9 que não continha armadura de pré-esforço, e foi utilizado como modelo padrão. O traçado transversal dos monocordões foi sensivelmente trapezoidal, com uma força de desvio devida ao pré-esforço de cima para baixo sobre o pilar e outras duas, de baixo para cima, distanciadas 1000 mm do centro do pilar.

Tabela 1 – Desvio vertical médio inicial do pré-esforço (em mm)

Modelo	AR8	AR10	AR11	AR12	AR13	AR14	AR15	AR16
a_{E-W}	39.3	40.3	42.2	36.9	39.9	32.4	34.3	42.4
a_{N-S}	41.3	40.7	41.6	36.6	36.7	37.9	39.4	40.5

Elaboraram-se duas séries distintas de ensaios. Numa primeira, todos os monocordões de pré-esforço passam sobre o pilar, variando-se a intensidade do pré-esforço de modelo para modelo. Numa segunda série, a intensidade do pré-esforço aplicado foi sensivelmente constante, tendo-se variado a distância dos monocordões de pré-esforço ao pilar.

Para aplicação da força de pré-esforço foram utilizados oito macacos hidráulicos, um por cada monocordão. Estes macacos hidráulicos estavam ligados pelo mesmo circuito hidráulico de forma a garantir igual pressão em todos eles. Após ter sido atingido o valor pretendido, a força de pré-esforço era mantida constante no decorrer de todo o ensaio. Optou-se por esta solução, porque caso contrário, a deformação da laje levaria a um incremento da força instalada nos monocordões de pré-esforço. Este incremento seria substancialmente maior nos modelos do que no protótipo, visto que os monocordões de pré-esforço nos modelos são bastante mais curtos do que seriam no protótipo.



Modelos AR8, AR10,
AR11 e AR16
a = 60 mm

Modelo AR12
a = 180 mm

Modelo AR13
a = 300 mm

Modelo AR14
a = 420 mm

Modelo AR15
a = 540 mm

Figura 3 – Traçado em planta dos monocordões de pré-esforço

Para garantir a inexistência de compressão nos modelos ensaiados foram utilizados quatro pórticos de reacção, nos quais se procedia à ancoragem dos monocordões de pré-esforço. Estes pórticos foram fixados à laje de reacção do laboratório, de maneira a poderem absorver a componente horizontal da força de pré-esforço.

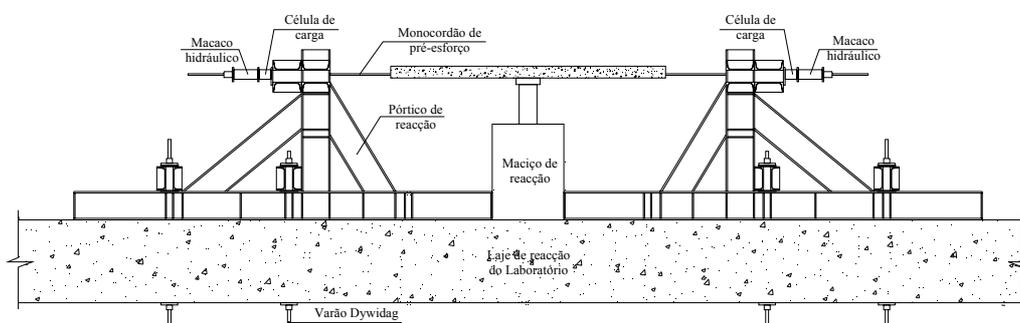


Figura 4 – Alçado lateral e pormenores dos pórticos de reacção

3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para a caracterização do betão utilizado na execução dos modelos, foram moldados provetes cúbicos (150x150x150 mm³), tendo estes sido ensaiados à compressão no dia da realização do ensaio respectivo. Na tabela seguinte apresentam-se os resultados obtidos.

Tabela 2 – Tensão média de rotura à compressão do betão em provetes cúbicos (MPa)

AR2	AR3	AR4	AR5	AR6	AR7	AR8	AR9	AR10	AR11	AR12	AR13	AR14	AR15	AR16
48.9	46.8	53.9	44.6	46.2	54.8	52.0	46.4	51.8	47.5	39.1	40.6	35.2	39.6	38.2

Foram igualmente ensaiados três provetes por cada diâmetro do aço utilizado na armadura longitudinal, apresentando-se na tabela seguinte os resultados obtidos. Em relação aos monocordões de pré-esforço utilizados estes apresentavam uma tensão limite convencional de proporcionalidade a 0.2% de 1855 MPa e uma tensão de rotura à tracção de 1978 MPa.

Tabela 3 – Tensão de cedência e de rotura à tracção do aço (MPa)

	Modelos AR2 a AR7		Modelos AR8 a AR13		Modelos AR13 a AR16	
	φ6	φ10	φ6	φ10	φ6	φ10
f _{sy} (MPa)	639	523	555	481	583	690
f _{su} (MPa)	732	613	670	633	604	720

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Todos os modelos elaborados foram ensaiados até à rotura por punçoamento. Os valores das cargas de rotura experimentais obtidas, foram comparados com os valores dos esforços resistentes previstos usando o preconizado pelo Eurocódigo 2 [2] (EC2) e pelo CEB-FIP Model Code de 1990 [3] (MC90) complementado pelas recomendações da FIP para o dimensionamento de lajes fungiformes pré-esforçadas [4]. No cálculo do valor médio resistente da força de punçoamento (V_{Rm}) não se consideraram os coeficientes parciais de segurança, sendo esta resistência determinada para os valores médios das características dos materiais. Na tabela seguinte é apresentada uma síntese destes resultados.

No conjunto de modelos utilizados para estudo de efeito da compressão, a comparação entre as cargas de rotura experimentais e os valores previstos pelo EC2 e pelo MC90/FIP, revelam que ambos os regulamentos apresentam valores para a resistência média ao punçoamento próximos dos obtidos experimentalmente. De referir que os relativamente bons resultados obtidos usando o preconizado pelo EC2, se devem provavelmente à gama de resistências à compressão do betão utilizado nestes modelos (tensões médias de rotura à compressão em provetes cúbicos próximos de 50 MPa). De facto, num documento recente da FIB [5], no qual se comparam as cargas de rotura experimentais com os valores previstos pelo EC2 para o esforço médio resistente, de 112 modelos de laje fungiforme não pré-esforçadas submetidas a ensaios de punçoamento centrado, conduzem a valores de V_{exp}/V_{Rm} próximos da unidade para resistências médias à compressão de cerca de 50 MPa. Para betões com mais alta resistência o EC2 sobrestima o valor médio da resistência ao punçoamento, enquanto que para betões de menores

resistências este valor é subestimado. Como informação adicional o valor médio de V_{exp}/V_{Rm} obtido para os 112 modelos considerados é de 1.28.

Nos modelos em que os monocordões de pré-esforço passam no interior da zona do pilar, os valores previstos para a resistência média ao punçoamento segundo o EC2 e o MC90/FIP são bastante próximos dos valores obtidos experimentalmente, desde que no cálculo da força de desvio sobre o pilar sejam utilizados os desvios verticais médios finais do pré-esforço, tendo em conta as deformações sofridas pelo modelo.

Tabela 4 – Comparação entre as cargas de rotura experimentais e previstas

Modelo	P (N-S) (kN) (1)	P (E-W) (kN) (2)	V_{exp} (kN) (3)	Código	V_{desvio} (kN) (4)	V_{eff} (kN) (5)	V_{Rm} (kN) (6)	V_{eff}/V_{Rm}
AR2	0	0	258	EC2	0	258	254	1.02
				MC90	0	258	270	0.96
AR3	464	0	270	EC2	0	270	245	1.10
				MC90	0	265	266	1.00
AR4	704	0	252	EC2	0	252	275	0.92
				MC90	0	244	279	0.88
AR5	470	466	251	EC2	0	251	235	1.07
				MC90	0	241	261	0.92
AR6	446	466	250	EC2	0	250	242	1.03
				MC90	0	240	265	0.91
AR7	653	622	288	EC2	0	288	279	1.03
				MC90	0	274	280	0.98
AR8	448	448	380	EC2	113.8	266.2	279.5	0.95
				MC90	113.8	266.2	277.9	0.96
AR9	0	0	251	EC2	0	251	259.8	0.97
				MC90	0	251	272.7	0.92
AR10	348	348	371	EC2	94.6	276.4	279.6	0.99
				MC90	94.6	276.4	278.4	0.99
AR11	239	239	342	EC2	63.5	278.5	259.0	1.08
				MC90	63.5	278.5	269.4	1.03
AR12	448	448	280	EC2	94.0	186.0	204.8	0.91
				MC90	94.0	186.0	238.5	0.78
AR13	446	446	261	EC2	92.4	168.6	223.3	0.76
				MC90	46.2	214.8	252.9	0.85
AR14	431	431	208	EC2	39.5	168.5	194.8	0.86
				MC90	0	208	239.6	0.87
AR15	445	445	262	EC2	0	262	217.8	1.20
				MC90	0	262	250.2	1.05
AR16	442	442	351	EC2	107.0	244.0	213.0	1.15
				MC90	107.0	244.0	249.4	0.98

(1) pré-esforço aplicado na direcção N-S (2) pré-esforço aplicado na direcção E-W

(3) valor experimental da carga de rotura (4) componente vertical do pré-esforço que passa na secção crítica

(5) força efectiva de punçoamento: EC2 - $V_{eff} = V_{exp} - V_{desvio}$, MC90 - $V_{eff} = V_{exp} - V_{desvio} - V_0$

(6) valor médio do esforço resistente ao punçoamento

Nos modelos em que os monocórdões não passam sobre o pilar observa-se que tanto o EC2, como o MC90/FIP conduzem a valores previstos para a resistência média ao punçoamento bastante mais elevados do que os valores obtidos experimentalmente, estando portanto contra a segurança.

5. CONCLUSÕES

Observou-se neste conjunto de ensaios, que a influência na resistência ao punçoamento da compressão no plano da laje é pequena. É possível constatar que houve exemplos em que o aumento do valor da compressão levou a um incremento ligeiro da carga de rotura, e outros em que se obteve um valor inferior. Não existe uma tendência clara, o que pode ser justificado pela sobreposição da dispersão dos resultados experimentais com a reduzida influência do efeito da compressão na resistência ao punçoamento.

É possível concluir ainda que o aumento da força de desvio vertical conduziu a uma maior resistência ao punçoamento dos modelos ensaiados. Por outro lado, o afastamento em planta dos monocórdões de pré-esforço em relação ao pilar, leva ao inverso, tendo-se registado decréscimos no valor da resistência ao punçoamento com o aumento desta distância.

Quando se procedeu ao estudo do efeito da posição em planta dos monocórdões de pré-esforço em relação ao pilar na carga de rotura ao punçoamento, constatou-se que tanto o preconizado pelo EC2, como pelo MC90/FIP conduzem a resultados contra a segurança (vide V_{eff}/V_{Rm} dos modelos AR12, AR13 e AR14). De facto ambos os regulamentos recomendam a consideração, ou não, da força de desvio vertical de um cabo de pré-esforço, no cálculo da força efectiva de punçoamento, com base somente no seu afastamento em planta em relação ao pilar. Experimentalmente observa-se que tal não é correcto, havendo exemplos de modelos em que apesar das duas famílias ortogonais de monocórdões terem sido colocadas à mesma distância em planta do pilar, só os monocórdões colocados com maior altura útil foram eficientes. Além disto a recomendação do EC2 no sentido de serem considerados todos os cabos que se encontrem a menos de $1.5d$ do perímetro do pilar parece-nos excessivamente contra a segurança.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Ramos, A. M. P.: *Punçoamento em Lajes Fungiformes Pré-esforçadas*, Tese para obtenção do grau de Doutor, IST, UTL, 2003, 292 p.
- [2] Norma Portuguesa NP ENV 1992-1-1: *Eurocódigo 2: Projecto de Estruturas de Betão – Parte 1.1: Regras Gerais e Regras para Edifícios*, Abril, 1998.
- [3] Comité Euro-International du Béton: *CEB-FIP Model Code 1990*, Bulletin d'information nº 213-214, Maio, 1993.
- [4] Fédération Internationale de la Précontrainte: *Recommendations for the Design of Post-Tensioned Slabs and Foundation Rafts*, Maio, 1998.
- [5] Fédération Internationale du Béton: *Punching of Structural Concrete Slabs*, Bulletin 12, Lausanne, Abril, 2001.