

PUNÇOAMENTO EM LAJES FUNGIFORMES REFORÇADAS COM PARAFUSOS TRANSVERSAIS ADERENTES (PARTE 2)

JORGE M. GOMES

Eng.º Civil
FCT - UNL
Lisboa
jorgomes@gmail.com

ANTÓNIO P. RAMOS

Prof. Eng.º Civil
FCT - UNL
Lisboa
ampr@fct.unl.pt

SUMÁRIO

Estudo experimental levado a cabo em cinco modelos de laje fungiforme maciça de betão armado à escala, para estudo da técnica de reforço com recurso a parafusos pré-esforçados pós-instalados. Como objetivos, pretendeu-se verificar as alterações de comportamento, modo de rotura e resistência entre ensaios com armadura específica de punçoamento aderente e não aderente, com a mesma percentagem de armadura longitudinal e de reforço. O Presente trabalho será apresentado em duas partes, sendo esta a segunda.

ABSTRACT

This paper presents a description of the experimental study carried out in five reduced flat slab concrete models, for the study of reinforcement technique using pre-stressed post-installed bolts. This study intended to verify behavior changes, mode of rupture and punching capacity between adherent and non-adherent shear reinforcement systems with the same flexural and shear reinforcing ratio. This work will be presented in two fases, being this one the first to be presented.

1. INTRODUÇÃO

Na primeira parte deste artigo, (Gomes e Ramos 2011) (Gomes e Ramos, "Efeito da Aderência na Resistência ao Punçamento de Lajes fungiformes Reforçadas com Parafusos Transversais" 2011) [1] [2], tinham sido já apresentados e descritos todos os modelos experimentais, tanto em termos de geometria, como da caracterização dos diversos materiais empregues na sua fabricação e posterior reforço. Foram apresentadas as cargas de rotura experimentais obtidas, bem como o comportamento na rotura. As cargas de rotura experimentais foram comparadas com as previsões preconizadas pelo EC2 (EC2 2004)[1] e ACI318 - 08 (ACI Committee 2008)[2].

Nesta segunda parte, serão analisadas, essencialmente, a evolução dos deslocamentos verticais ao longo do ensaio, a evolução da força instalada na armadura específica de punçamento pós-instalada e, será apresentada a geometria das superfícies de rotura.

2. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

Os modelos ensaiados consistem em painéis quadrados de laje de betão armado com dimensões em planta de 1800 x 1800 mm² com 120 mm de espessura. Quatro destes modelos foram reforçados com a introdução de parafusos verticais pré-esforçados, sendo dois sujeitos a uma ligação não aderente e os restantes dois aderentes, tendo o restante sido utilizado como modelo de referência para posterior comparação de resultados. Estes modelos simulam exclusivamente a área de laje junto ao pilar, limitada pelas linhas de inflexão, onde os momentos flectores são nulos.

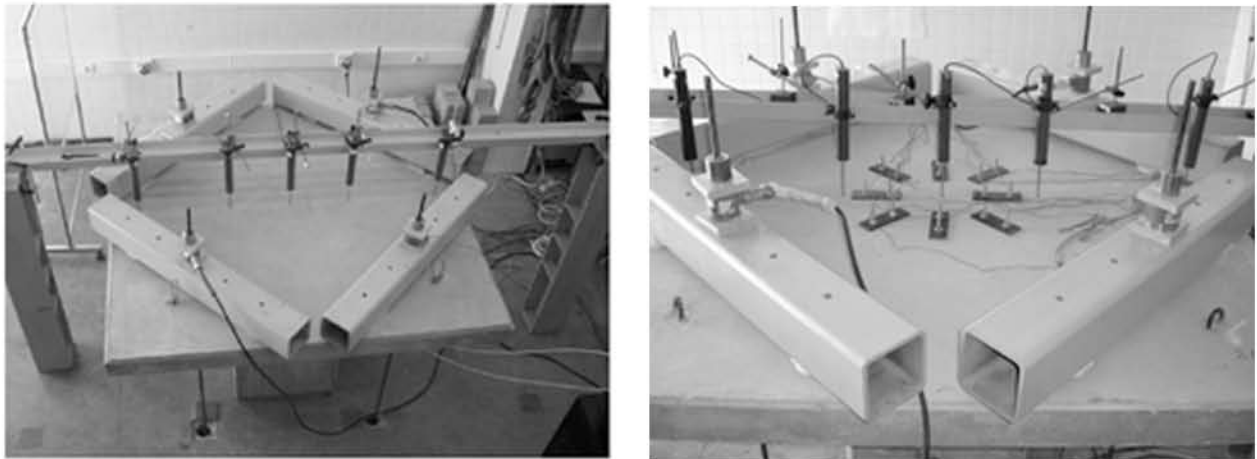


Figura 1 - Aspecto geral dos modelos ensaiados antes e depois do reforço - vista superior

De forma a simular as condições de fronteira cinemáticas, tendo em conta que os bordos dos modelos de laje correspondem a zonas de momentos nulos e, o seu carregamento é aplicado na zona central, este dispositivo corresponde à utilização de quatro perfis metálicos RHS, sob os quais estão instalados oito placas de aço com dimensões de 100 x 100 x 20 mm³, que em conjunto servem de ancoragem a cordões de aço de alta resistência com diâmetro de 0.6". Estes cordões atravessam o modelo e são ancorados à laje de reacção do laboratório. Desta forma, impedimos os deslocamentos verticais e libertamos as rotações, permitindo assim aos bordos das lajes serem livres de rodar. O pilar central é materializado por uma placa de aço com dimensões 200 x 200 x 50 mm³, com rigidez suficiente para manter a superfície de contacto plana quando sujeita ao carregamento por intermédio do macaco hidráulico (ENERPAC RRH 1006) localizado sob a mesma.

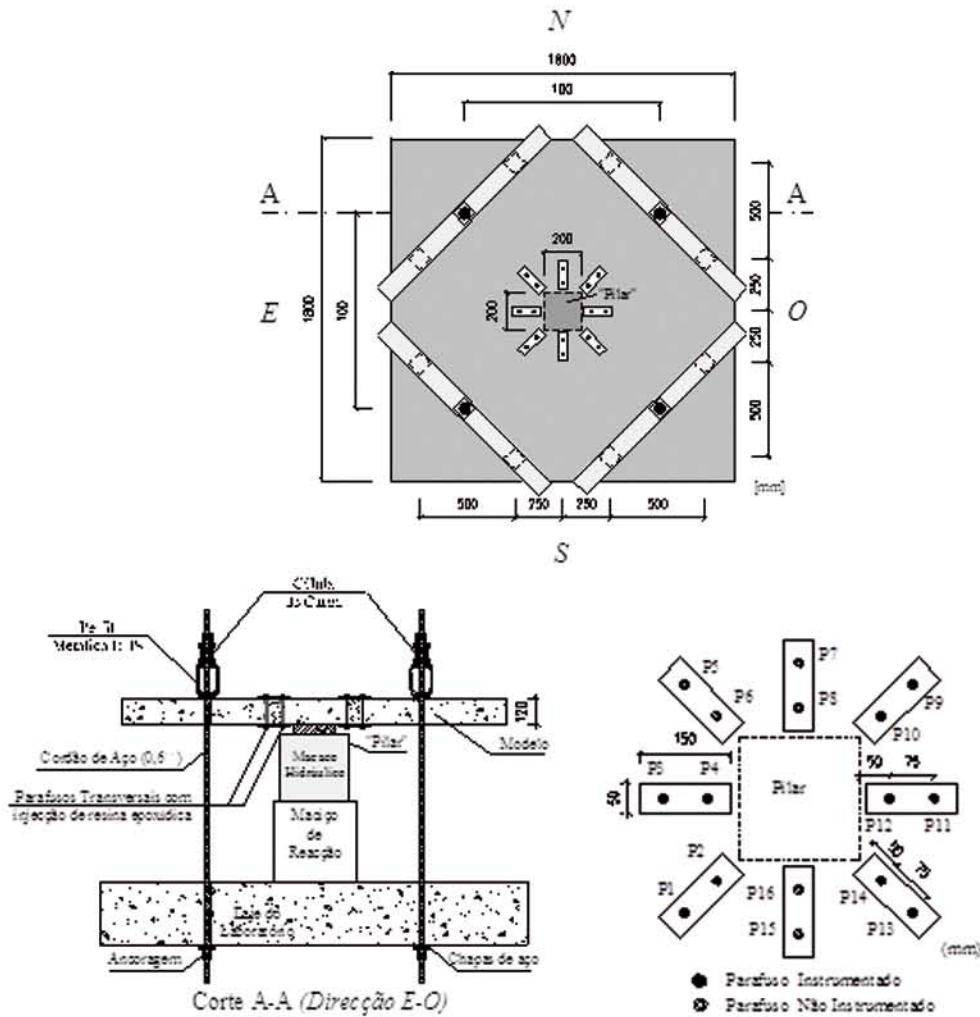


Figura 2 - Definição geométrica dos modelos ensaiados

As armaduras longitudinais de flexão, superior e inferior, foram determinadas para se obter uma rotura por punçoamento. As armaduras, superior e inferior, são constituídas por uma malha quadrada de $\varnothing 10/0.075$ m e $\varnothing 6/0.20$ m, respectivamente; em que a armadura superior com a maior altura útil é a orientada na direcção N-S. O recobrimento foi de aproximadamente 20 mm na face superior e 10 mm na face inferior.

Os ensaios foram realizados em duas fases distintas. Numa primeira fase, os modelos foram carregados até se atingir um estado de fendilhação considerável (correspondente a cerca de 60% da carga de rotura do modelo de referência). Seguidamente os modelos foram descarregados e reforçados através da colocação de 16 parafusos transversais, dispostos em duas camadas em torno do pilar, tal como se pode observar na figura 2 e Figura 3, sendo posteriormente pré-esforçados com um valor pré-definido. Em dois dos modelos foi utilizado uma resina epoxídica para garantir aderência entre os parafusos de reforço e a laje.

Foram usados parafusos roscados M6 e M8, ancorados a chapas de aço de $150 \times 50 \times 5$ mm³. As forças médias iniciais nos parafusos foram de 2.9 kN nos modelos M6 e M6b (parafuso M6), e 6.7 kN nos modelos M8 e M8b (parafuso M8). Esta força de aperto foi aplicada com recurso a uma chave dinamométrica.

A instrumentação usada consistiu em seis extensómetros colocados em três varões da armadura longitudinal superior, dezasseis extensómetros colocados em oito parafusos de reforço (Figuras 2 e 3), quatro células de carga para monitorização da carga vertical aplicada e cinco LVDT para medição dos deslocamentos verticais dos modelos (Figuras 1, 2 e Figura 5).

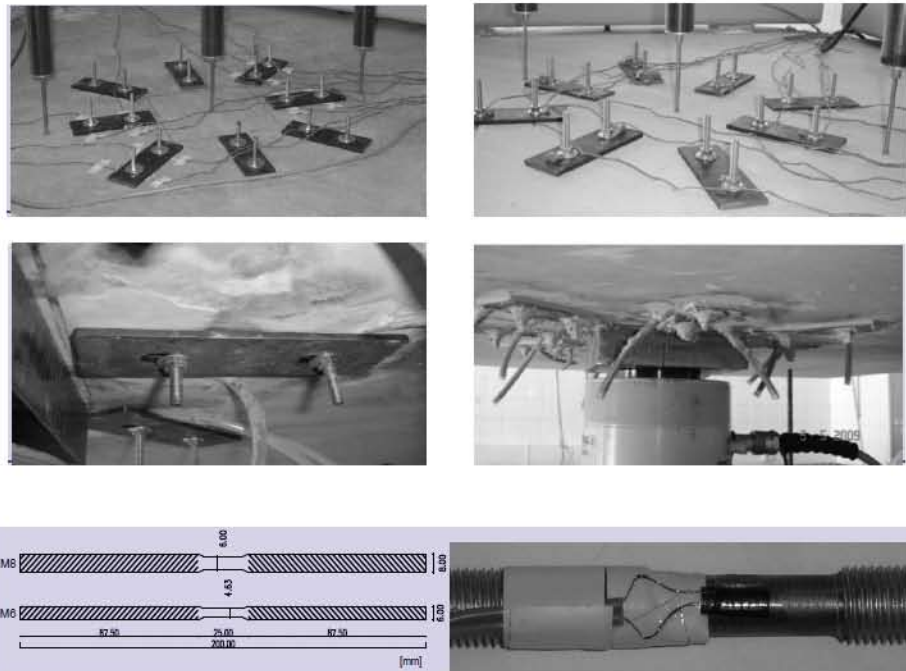


Figura 3 - Geometria dos Parafusos de reforço e exemplo de um parafuso instrumentado

3. DESLOCAMENTOS VERTICAIS

Para os modelos ensaiados com o mesmo tipo de parafusos de reforço, foram elaborados gráficos do deslocamento em função da carga vertical aplicada, assim como foi elaborada a respectiva deformada para diversos patamares de carga. Observando a Figura 4, verificamos que a injeção de resinas no espaço em volta dos parafusos pré-esforçados (modelo M6b) provocou uma menor deformação do modelo até uma carga próxima dos 300 kN, em relação ao modelo sem injeção (M6), mantendo o diâmetro dos mesmos. No entanto, os deslocamentos finais obtidos no modelo M6b foram superiores, mas associados a uma também superior carga de rotura experimental. A injeção do espaço em volta dos parafusos no modelo M6b levou a aumento substancial do deslocamento vertical máximo de 66 % em relação ao modelo sem injeção (M6). Em termos de grandeza de valores, constatamos a existência de máximos nas extremidades dos modelos (a 750 mm do centro do modelo), muito superiores na rotura no modelo M6b (aderente). O modelo M6 atinge a rotura para uma carga de 331 kN e um deslocamento máximo de 10,6 mm. O modelo M6b (aderente por injeção de resinas) atinge a rotura com uma carga de 374 kN e um deslocamento máximo de 17,6 mm.

Para o modelo M8 obtemos um valor final de deslocamentos de 18,9 mm, superior em 2,25 vezes ao valor do modelo de referência, e um valor final para o modelo M8b de 22,1 mm, superior 2,63 vezes ao valor de referência e 17 % superior ao modelo M8.

Para uma carga de cerca de 75 % do valor final de rotura, o modelo M8b, com resina, apresenta um menor deslocamento vertical em relação ao M8, sem resina. Ultrapassado este valor, o modelo com resina altera o seu comportamento e passa a ter o maior deslocamento vertical até atingir o valor de rotura.

Em termos gerais e para vários patamares de carga, verifica-se que a deformada dos modelos se concentra junto à face do pilar, sendo nas restantes partes dos modelos semelhante a uma rotação de corpo rígido.

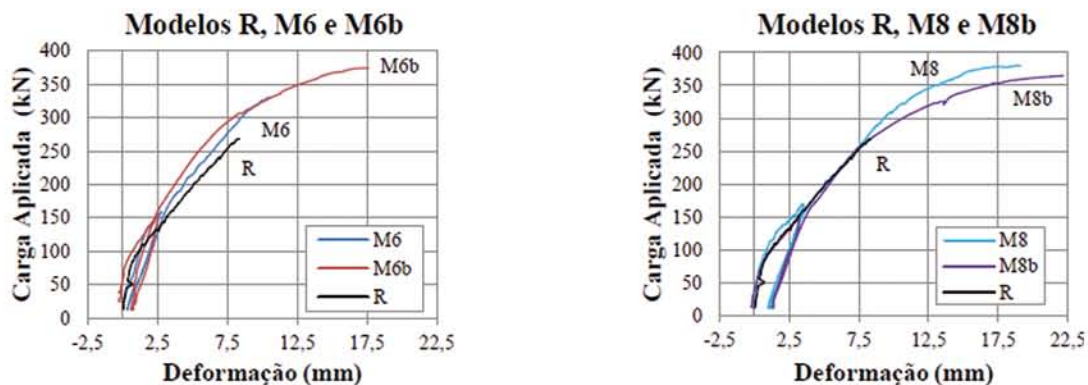


Figura 4 - Evolução dos deslocamentos verticais com a carga vertical aplicada nos modelos R, M6, M6b, M8 e M8b, a uma distância de 750 mm em relação ao centro da laje, na direcção E-O

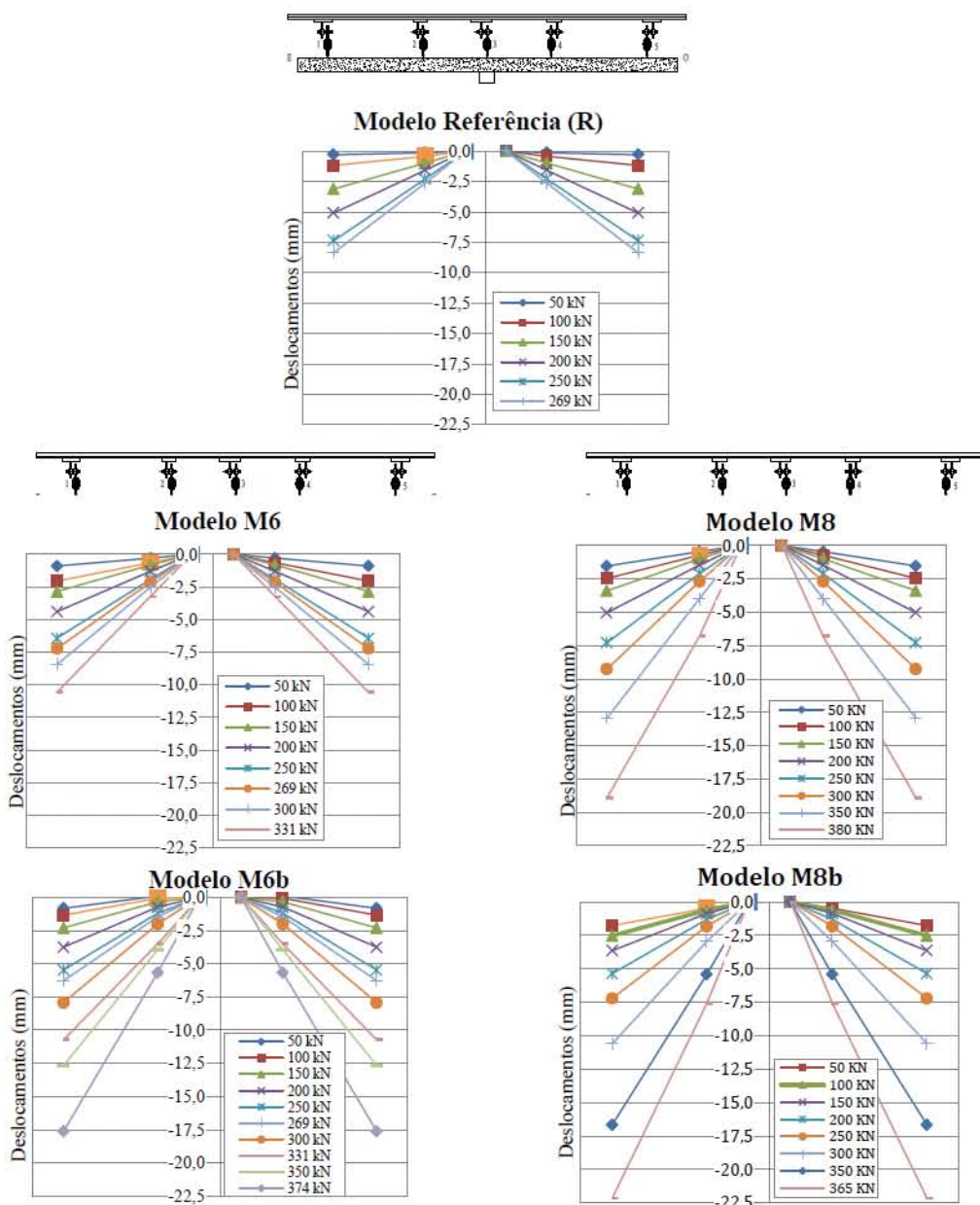


Figura 5 - Deformada na direcção “N-S” para vários patamares de carga (modelos M8 e M8b)

Quadro I - Deslocamentos em 3 patamares de carga

Tipo de Reforço	Modelo	Parafuso de reforço	F _{1,p} (kN)	V _{exp} (kN/desl.(mm))	V=200kN desl.(mm)	V=250kN desl.(mm)	V=269kN desl.(mm)
-	R	-	-	269 / 8.4	5.1	7.3	8.4
Não Aderente	M6	M6	3.3	331 / 10,6	4.4	6.4	7.2
Aderente	M8	M8	4.7	380 / 18,9	5.0	7.3	8.0
Aderente	M6b	M6	2.4	374 / 17,6	3.8	5,5	6,3
	M8b	M8	4.1	365 / 22,1	5.4	7.2	8.3

Nota: F_{1,p} - força inicial dos parafusos de reforço; V_{exp} - carga de rotura experimental; ε_{méd} - extensão média correspondente a V_{exp}

Através do quadro e figuras anteriormente apresentadas, e, comparando o modelo de referência com os modelos aderentes e não aderentes, verificamos que as deformações diminuem ligeiramente com a introdução dos parafusos transversais (modelo R quando comparado com os restantes), para patamares de carga semelhantes. A introdução de resina conduz a comportamentos bem distintos entre modelos, e os resultados algo inconclusivos.

Nos modelos M6 e M6b, verifica-se uma menor deformação da laje, para os patamares de comparação em relação ao modelo de referência, assim como uma menor deformada entre modelos homólogos com a introdução de resina; o que evidencia um aumento de rigidez dos modelos com os respectivos reforços. Nos modelos M8 e M8b, verifica-se uma maior deformação não só entre o modelo de referência, como na comparação entre os modelos com parafusos de menor diâmetro (M6 e M6b). As deformadas obtidas para o modelo M8b são superiores às obtidas no modelo M8, ao contrário do que tinha acontecido nos modelos M6 e M6b. Constata-se que os modelos reforçados apresentam maior ductilidade que o modelo de referência, e entre estes, os mais ducteis são os modelos com comportamento aderente.

Por intermédio das figuras anteriores é facilmente perceptível, a percepção do aumento da ductilidade entre modelos, com o aumento do diâmetro dos parafusos pré-esforçados.

As flechas na rotura apresentam sempre valores superiores nos modelos reforçados em relação aos registados no modelo de referência, associadas igualmente a maiores cargas de rotura.

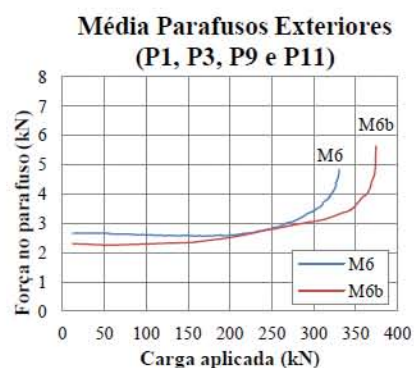
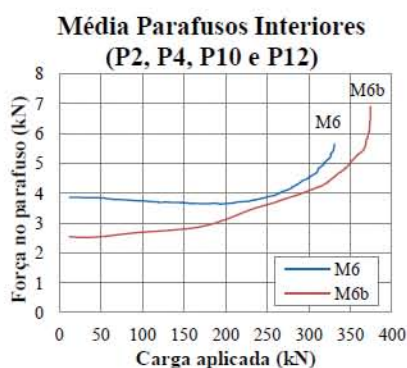
Verifica-se, então, que quando o espaço em volta dos parafusos é injectado com resina epoxídica, o mecanismo de formação da rotura da laje é retardado, em comparação com as lajes reforçadas com parafusos sem injeção. Isto deve-se ao facto de a injeção do espaço em volta dos parafusos diminuir o nível de tensão e prevenir o escorregamento repentino destes. O que conduz a uma superior área de ligação e de transferência de esforços, pela ligação ser mais monolítica, melhorando a resistência da laje, assim como, controlar melhor a abertura de fendas necessária para a existência de rotura por punçoamento.

4. EVOLUÇÃO DA FORÇA NOS PARAFUSOS DE REFORÇO

A evolução da força nos parafusos de reforço foi materializada por intermédio de 16 extensómetros (2 por parafuso) localizados em 8 parafusos (P1 a P4 e P9 a P12.). Na Figura 3 é possível localizar e identificar todos os parafusos instrumentados.

Em função das extensões, foi possível determinar a força instalada nos parafusos no decorrer do ensaio. Este cálculo foi determinado por intermédio de expressões baseadas nos gráficos de caracterização do aço dos parafusos de reforço.

Para cada tipo de parafuso, elaborou-se um gráfico da extensão em função da força aplicada nos parafusos através da extensão correspondente. Com base nesses dados foram calculadas as forças.



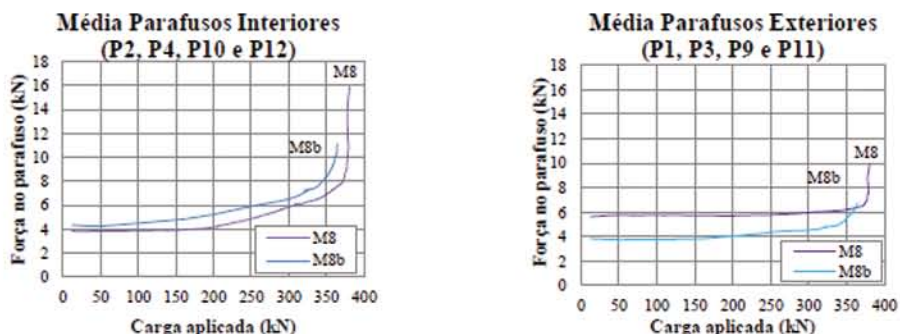


Figura 6 - Evolução da força média nos parafusos Interiores e Exteriores dos modelos

Em geral, os parafusos interiores dos modelos reforçados são bastante mais solicitados que os exteriores, iniciando a sua solicitação mais cedo que os exteriores em ambos os modelos. O comportamento evidenciado pelos modelos é idêntico ao já descrito, ou seja, ambos têm duas fases de carregamento. Inicialmente, a força instalada nos parafusos mantém-se sensivelmente constante até aos 200 kN no modelo M8, e até aos 50 kN no modelo M8b; contudo, o modelo M8b começou a ser solicitado mais cedo que o modelo M8.

A injeção de resina conduz a uma mobilização da participação dos parafusos mais gradual, desde o início do carregamento. O quadro seguinte apresenta um resumo das forças, iniciais e finais, de todos os parafusos instrumentados, nos modelos M8 e M8b, sendo: F_i - força inicial aplicada ao parafuso; F_f - força final aplicada ao parafuso.

Quadro II - Resumo das forças iniciais e finais dos parafusos nos modelos M8 e M8b

Parafuso	Modelo M8 (não aderente)			Modelo M8b (aderente)			
	F_i (kN)	F_f (kN)	Variação	F_i (kN)	F_f (kN)	Variação	
Exterior	1	6,1	9,9	3,8	4,2	8,0	3,9
	3	5,5	11,3	5,8	2,4	2,5	0,1
	9	6,8	8,6	1,8	4,0	7,3	3,3
	11	4,1	9,9	5,8	4,8	9,2	4,4
	Média	5,6	9,9	4,3	3,8	6,7	2,9
Interior	2	4,2	16,7	12,5	3,3	12,5	9,2
	4	4,7	14,6	9,9	4,7	7,9	3,2
	10	2,5	16,4	13,9	3,8	16,1	12,2
	12	-	-	-	5,5	8,1	2,7
	Média	3,8	15,9	12,1	4,3	11,1	6,8

5. INCLINAÇÃO DAS SUPERFÍCIES DE ROTURA

Após a realização dos ensaios, procedeu-se ao corte dos modelos com serra circular e elaborou-se um levantamento geométrico das superfícies de rotura obtidas.

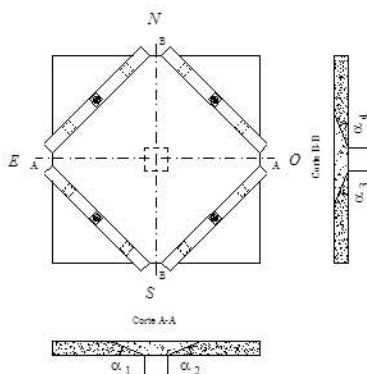


Figura 7 - Inclinações da superfície de rotura com a horizontal

No quadro XIII, apresenta-se um resumo das inclinações da superfície de rotura com a horizontal, observadas em cada um dos cortes efectuados, sendo α o ângulo formado pela superfície de rotura com o plano da laje. Observando o Quadro XIII, verifica-se que os modelos, em que os parafusos foram aderentes, apresentaram inclinações médias ligeiramente inferiores à dos modelos análogos com reforço não aderente. As inclinações da superfície de rotura com a horizontal são sempre maiores nos modelos reforçados, quando comparados com o modelo de referência.

Quadro III - Inclinações da superfície de rotura com a horizontal

Ligação	Modelo	$(\alpha_1 + \alpha_2) / 2$ (°)	$(\alpha_3 + \alpha_4) / 2$ (°)	α médio (°)
Não Aderente	R	30	32	31
	M6	40	39	40
	M8	46	44	45
Aderente	M6b	46	32	39
	M8b	35	34	35

Na figura seguinte, são apresentadas fotografias de duas metades de um corte dos modelos M6b e M8b (modelos aderentes), onde, com clareza, podemos observar diferenças entre as superfícies de rotura dos modelos com parafusos de reforço de menor e maior diâmetro injectados com resina epoxídica (M6b e M8b, respectivamente).

De facto, o aumento de diâmetro dos parafusos (de 6 mm para 8 mm) originou uma alteração da posição da superfície de rotura, que passou a ser pelo exterior do reforço.

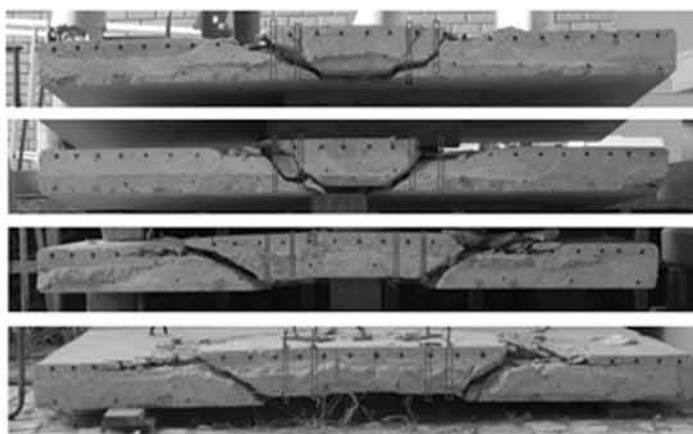


Figura 8 - Superfície de rotura dos modelos aderentes (2 metades superiores - M6b e 2 metades inferiores - M8b)

As fotografias evidenciam, de uma forma clara, a rotura, pelo interior do reforço no modelo M6b e, pelo exterior do modelo M8b. Nestas figuras, é facilmente perceptível a localização dos parafusos pelos rasgos verticais marcados a vermelho pela presença de resina entre os parafusos de reforço.

Em termos de modos de rotura por punçoamento, podemos destacar, rotura interior ao reforço (Figura 18 (a)), rotura pelo interior do reforço (Figura 18 (d)), rotura ao longo do reforço (Figura 18 (b)) e rotura exterior ao reforço (Figura 18 (c) e (e)).

Pela observação do Quadro VIII e Figura 4, verifica-se que com a introdução de resinas epoxídicas, no espaço entre os parafusos e a laje, a superfície de rotura nos modelos com parafusos de menor diâmetro (parafusos M6), passou do interior do reforço (Figura 18 - tipo (d)) - modelo M6 para uma rotura ao longo deste (Figura 18 - tipo (b)) - modelo M6b), assim como, a forma de rotura nos modelos com maior diâmetro (parafusos M8), apesar de idêntica (exterior ao reforço), obteve um maior afastamento da linha de rotura em relação ao reforço no modelo injectado com resinas na sua ligação entre os parafusos e a laje (M8b). O modo de rotura passou da Figura 18 (c) para a Figura 18 (e), obtendo o modelo M8b o maior tronco de pirâmide de entre os modelos analisados. Este fenómeno é facilmente observável pela comparação entre fotografias do modo de rotura, apresentadas anteriormente por intermédio das Figuras 5, 6, 7, 8, e Figura 9.

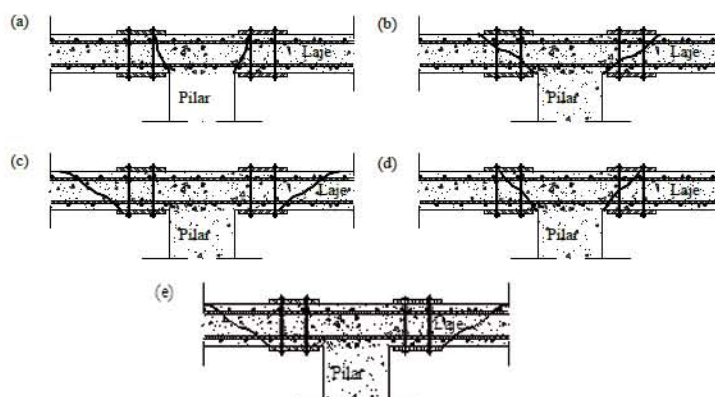


Figura 9 - Possível modo de rotura de lajes fungiformes quando sujeitas a reforço transversal

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente artigo descreve os ensaios experimentais de modelos de laje fungiforme maciças reforçadas com parafusos verticais pré-esforçados aderentes e não aderentes. Verifica-se que o uso desta técnica simples, económica e de rápida execução, aumenta significativamente a resistência das lajes ao punçoamento, assim como a sua ductilidade, sendo este aspecto muito importante em zonas sísmicas, como é o caso de Portugal. Foram obtidos incrementos de resistência que variaram de 15 % a 42 %. A utilização de parafusos pré-esforçados conduziu ainda a uma redução dos deslocamentos da estrutura quando comparados com o modelo de referência. A existência de aderência entre os parafusos de reforço e a laje originou um melhor desempenho desta solução. A utilização dos parafusos enquanto armadura transversal de reforço alterou o modo de rotura da laje. Situação provocada pelo aumento do diâmetro e número de parafusos, o número de camadas, o seu posicionamento e o facto de serem ou não injectados com resina epoxídica.

7. AGRADECIMENTOS

Os ensaios descritos neste artigo foram realizados no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. A esta instituição agradecemos os meios colocados à disposição. Este trabalho recebeu ainda apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia - Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior através do Projecto PTDC/ECM/114492/2009.

Manifestamos igualmente reconhecimento à Concremat, S.A., pelo seu contributo à realização destes ensaios através da fabricação dos modelos ensaiados e, à empresa HILTI, pelos kits de resina epoxídica fornecidos.



JORGE M. GOMES

Eng.º Civil
FCT - UNL
Lisboa



ANTÓNIO P. RAMOS

Prof. Eng.º Civil
FCT - UNL
Lisboa