

## REFORÇO DE LAJES FUNGIFORMES

### Anomalias, Causas e Soluções

#### Válter J. G. Lúcio

*Professor Associado, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Portugal, vlucio@fct.unl.pt*

#### António M. P. Ramos

*Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Portugal, ampr@fct.unl.pt*

#### Duarte M. V. Faria

*Estudante de doutoramento no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Bolseiro da FCT, Portugal, duamvf@gmail.com*

## 1 INTRODUÇÃO

Devido às diversas vantagens construtivas e funcionais que as estruturas de lajes fungiformes apresentam, estas tornaram-se bastante comuns. Por outro lado, o comportamento desta solução estrutural é muito mais complexo que o das estruturas porticadas e nem sempre ele é bem compreendido pelos projectistas, pelos empreiteiros, ou ainda, pelos seus utilizadores.

É frequente surgirem erros de projecto relativos a concepções erradas, a dimensionamentos insuficientes das espessuras das lajes e a pormenorizações inapropriadas das armaduras. Nas zonas da ligação das lajes aos pilares surgem elevadas concentrações de esforços (de flexão e de corte), fendilhação elevada e, conseqüentemente, curvaturas significativas. As curvaturas elevadas condicionam a deformação das lajes para as cargas verticais e determinam uma elevada flexibilidade em relação às acções horizontais (vento e sismos). Durante a execução destas estruturas é corrente cometerem-se erros resultantes da incompreensão do funcionamento das lajes fungiformes ou do desrespeito pelas especificações do projecto. Na fase de utilização, a alteração da função dos edifícios, com o aumento das cargas em relação aos valores inicialmente previstos, e a execução de aberturas junto aos pilares para passagem de condutas, são algumas das causas de anomalias nestas estruturas.

Este texto é uma síntese da comunicação apresentada no Seminário Internacional sobre Ligações Estruturais - SILE08. Nesta comunicação apresentam-se as anomalias correntes neste tipo de lajes e as suas causas. São apresentadas diversas soluções de reforço de estruturas de lajes fungiformes e, por fim, é apresentado o trabalho de investigação em curso na Universidade Nova de Lisboa sobre o reforço de lajes fungiformes.

## 2 ANOMALIAS ESTRUTURAIS E SUAS CAUSAS

### 2.1 ANOMALIAS MAIS FREQUENTES

As anomalias estruturais mais frequentes em estruturas de lajes fungiformes estão relacionadas com a deficiente resistência à flexão e ao punçoamento. A insuficiente resistência a estes esforços é mais grave quando surge nas zonas adjacentes aos pilares, onde a concentração de esforços é elevada devido às reduzidas dimensões do apoio da laje.

A insuficiente resistência ao punçoamento pode conduzir ao colapso brusco das lajes e ao colapso progressivo de um piso ou da totalidade da estrutura. Este tipo de rotura é frequente e já aconteceu no nosso país, felizmente sem perda de vidas humanas.

Um outro aspecto característico deste tipo estrutural é a sua elevada sensibilidade às acções sísmicas, ou, em edifícios altos em zonas de fraca sismicidade, a deformabilidade excessiva para a acção do vento, com vibrações que podem ser incómodas para os utentes [1].

Em serviço é usual surgirem situações de fendilhação e de deformação excessivas. A deformação excessiva da laje conduz normalmente à fendilhação das paredes de alvenaria e a pavimentos deformados, enquanto a fendilhação excessiva nem sempre é aparente por ficar escondida pelos revestimentos dos pavimentos e pelos tectos falsos, podendo-se, no entanto, manifestar através da fendilhação de pavimentos rígidos ou na redução da durabilidade de lajes expostas a ambientes agressivos.

Podem-se, assim, enumerar as seguintes anomalias mais frequentes em lajes fungiformes:

- Insuficiente resistência à flexão;
- Insuficiente resistência ao punçoamento;
- Colapso progressivo;
- Sensibilidade às acções sísmicas;
- Fendilhação excessiva;
- Deformação excessiva.

## 2.2 CAUSAS FREQUENTES

As anomalias referidas resultam frequentemente de erros de projecto, de execução ou de cargas excessivas em resultado de utilização incorrecta das estruturas.

### 2.2.1 Erros de projecto

Na fase de concepção da estrutura acontece com alguma frequência o projectista sobrevalorizar a rigidez, a resistência e a ductilidade para as acções sísmicas das ligações laje-pilar [2,3]. Os sistemas de lajes fungiformes devem ser complementados com sistemas que possuam rigidez, resistência e comportamento dúctil para a acção sísmica (Fig. 1). Assim, em zonas sísmicas as estruturas de lajes fungiformes devem ser auxiliadas por paredes resistentes e/ou pórticos viga-pilar, normalmente localizados no contorno do edifício.



**Fig. 1 - Edifício com estrutura de lajes fungiformes sem paredes resistentes nem pórticos na periferia.**

Um outro aspecto bastante importante no comportamento das lajes fungiformes é a possibilidade de ocorrer a rotura por punçoamento nas zonas de ligação da laje ao pilar (Fig. 2). Este tipo de rotura não é dúctil, isto é, a laje não apresenta sintomas evidentes antes da rotura acontecer. Pelas razões referidas anteriormente, a fendilhação não é normalmente aparente e a rotura por punçoamento está associada a deformações muito pequenas que nem sempre são perceptíveis. Este tipo de rotura é brusco e não apresenta aviso prévio à sua ocorrência. A rotura por punçoamento pode, inclusivamente, conduzir ao colapso progressivo da estrutura [4]. Têm ocorrido casos de colapso progressivo em estruturas de lajes fungiformes em fase construtiva (Fig. 3), em situações de sobre-utilização dos edifícios (excesso de carga) ou durante a acção de sismos.



Fig. 2 - Rotura por punçoamento (num edifício em Portugal).



Fig. 3 - Colapso progressivo causado por erros de execução (num edifício em Portugal).

As ligações da laje aos pilares de bordo e de canto estão sujeitas a forças de punçoamento com grandes excentricidades, sendo esta outra razão para se dever considerar vigas no contorno dos pisos e evitar ligações laje-pilar de bordo e de canto (Fig. 4).

Alguns projectistas concebem lajes fungiformes como se de lajes vigadas se tratasse. Estas lajes são apoiadas em vigas fictícias designadas na gíria como “**vigas deitadas**” (Fig. 5) e que possuem a espessura da laje e a largura dos pilares onde apoiam. Este tipo de concepção está completamente errado e conduz a riscos elevados de colapso da estrutura.

Ao contrário das lajes vigadas, que possuem os maiores esforços de flexão segundo o menor vão, o dimensionamento as lajes fungiformes é condicionado em flexão e em deformação pelo seu maior vão.

As lajes fungiformes dimensionadas com “**vigas deitadas**” também estão sujeitas a fenómenos de punçoamento junto aos pilares e também necessitam do auxílio de sistemas alternativos (paredes resistentes e/ou pórticos viga-pilar) para resistir à acção sísmica.



**Fig. 4- Evitar ligações laje-pilar nos bordos e nos cantos das lajes.**

No dimensionamento das lajes é comum o projectista usar espessuras reduzidas para os vãos e cargas a que estas irão estar sujeitas. As lajes excessivamente esbeltas conduzem a deformações excessivas (Fig. 6), a dificuldades na pormenorização das armaduras de flexão e de punçoamento, e a situações críticas de resistência ao punçoamento. A deformação excessiva das lajes pode causar danos consideráveis nas paredes de alvenaria (Fig. 7) e nos envidraçados.

O dimensionamento e pormenorização correctos das armaduras de flexão é, normalmente, suficiente para controlar a fendilhação por flexão. Em lajes, a existência de fendas com abertura excessiva é frequentemente um sintoma de insuficiência de armaduras para o estado limite de resistência à flexão (Fig. 8 e 9).

Na verificação da segurança aos estados limites de resistência ao punçoamento é também um erro frequente desprezar a excentricidade da força de punçoamento. Os erros na quantificação das forças de punçoamento, designadamente na quantificação dos efeitos das acções verticais e dos sismos, podem conduzir a situações de risco elevado de colapso. Os erros na pormenorização, ou até a ausência, das armaduras de punçoamento são, igualmente, usuais. Não nos podemos esquecer que a rotura por punçoamento é brusca, não tem pré-aviso e pode conduzir ao colapso progressivo de toda a estrutura.

Por analogia com as lajes vigadas, é frequente considerar, erradamente, apenas metade das cargas verticais no dimensionamento das lajes fungiformes.

### **2.2.2 Erros de execução**

Em fase de execução das estruturas, os erros podem surgir por incúria, ignorância ou com o propósito de reduzir os custos da obra, desrespeitando o especificado no projecto. Têm-se encontrado situações de redução da espessura da laje em relação ao definido em projecto,

utilização de betões com classe de resistência inferior à especificada, montagem inapropriada das armaduras de flexão, ou redução em relação ao patente nos desenhos do projecto, e ainda, a não colocação das armaduras de punçoamento ou montagem errada destas. Na Figura 3 pode-se observar o resultado de alguns destes erros.

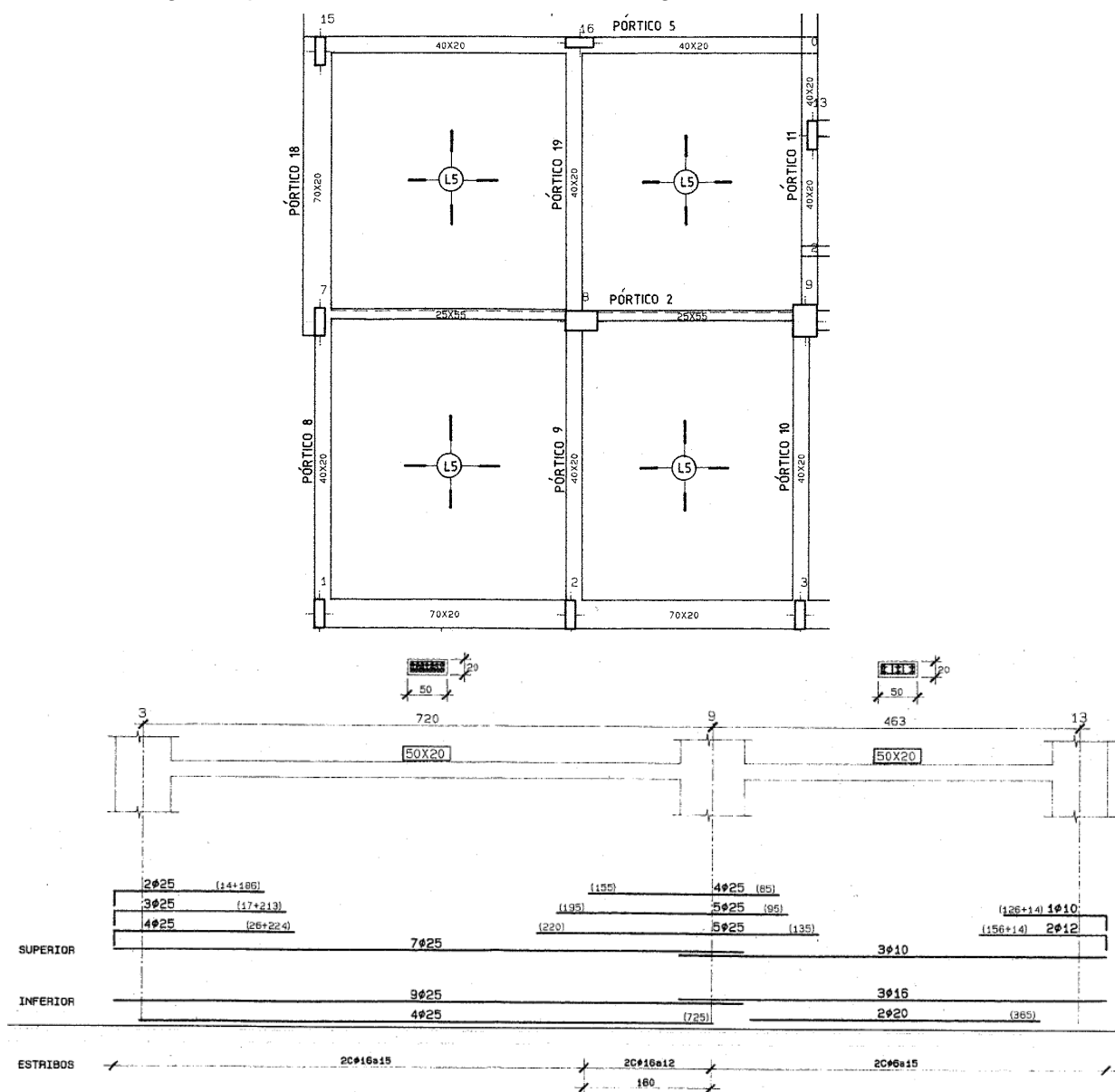


Fig. 5 - "Vigas deitadas".



Fig. 6 - Deformação excessiva devido a elevada esbelteza da laje.

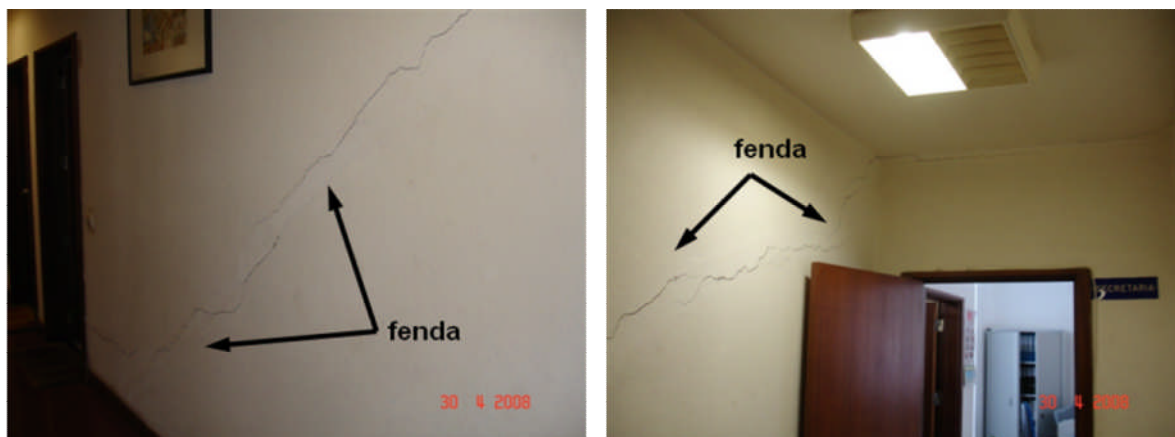


Fig. 7 - Fendas em paredes de alvenaria causadas por deformação excessiva da laje fungiforme.



Fig. 8 – Fendilhação numa laje fungiforme nervurada

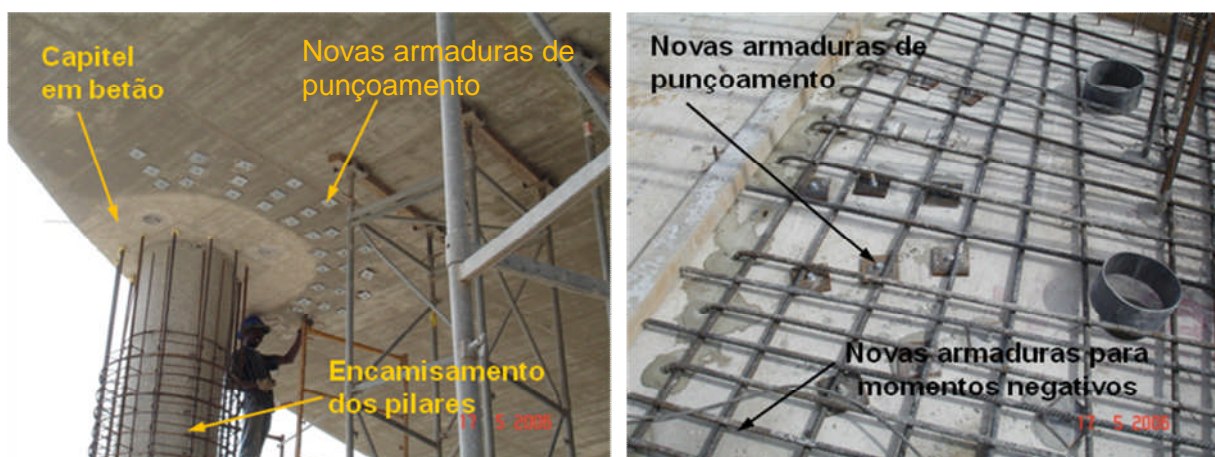


Fig. 9 - Inspeção às armaduras de uma laje fungiforme.

### 3 SISTEMAS DE REFORÇO DE LAJES FUNGIFORMES

Os sistemas de reforço mais correntes podem ser classificados em passivos, se apenas são eficazes para as cargas aplicadas na laje após a sua instalação, ou de activos se se tornam eficazes também para as cargas já instaladas na laje. O sistema de reforço activo mais usual consiste na aplicação de pré-esforço.

Existem sistemas de reforço que são dirigidos quase exclusivamente para a resolução do problema da resistência ao punçoamento. Estes sistemas consistem na adição de armaduras de punçoamento (Fig. 10) ou de capitéis, em betão armado (Fig. 10 e 11) ou com perfis metálicos, pela face inferior da laje.



**Fig. 10 – Reforço dos pilares de betão por encamisamento, e da laje ao punçoamento com capitéis e à flexão na face superior.**



**Fig. 11 – Reforço dos pilares de betão por encamisamento, e da laje ao punçoamento com capitéis em betão armado.**

Outros sistemas introduzem, simultaneamente, benefícios em diversos aspectos do comportamento estrutural das lajes, tais como a flexão, a deformação, a fendilhação e a resistência ao punçoamento. São exemplos deste tipo de reforços: o aumento da espessura da laje pela face superior, com inclusão de armaduras de flexão (Fig. 10); a adição de armaduras exteriores em aço (chapas) ou em fibras de carbono; o pré-esforço exterior com aço de alta resistência (cordões ou barras) ou com laminados de fibras de carbono; e a alteração do sistema estrutural com a introdução de novos pilares ou vigas (Fig. 12 e 13).



Fig. 12 - Colocação de novos pilares de betão, capitéis e reforço da laje para momentos negativos na zona do novo apoio.



Fig. 13 - Reforço por alteração do sistema estrutural com a colocação de novos pilares metálicos.

## 4 INVESTIGAÇÃO EM CURSO NA FCT/UNL

Reforço de lajes com pós-esforço usando ancoragens por aderência. Doutoramento em curso do Eng. Duarte Viúla Faria, sob orientação de Válder Lúcio e de Pinho Ramos. Sistema patenteado para introdução de pós-tensão com ancoragens por aderência.

### 4.1 REFORÇO AO PUNÇOAMENTO COM ARMADURAS TRANSVERSAIS PÓS-INSTALADAS

Este trabalho teve início em 1994, no IST, com a dissertação de Mestrado do Prof. António Pinho Ramos. Sob a orientação do Prof. Pinho Ramos foram desenvolvidos recentemente estudos na FCT-UNL: dissertação de Mestrado de Inácio Duarte e a dissertação de Mestrado (Bolonha) de Marta Luís. Estão em curso outros trabalhos neste domínio que conduzirão a mais duas teses de Mestrado.

#### 4.1.1 Ensaio de Ramos (1995)

Ramos [5,6] ensaiou dois modelos de lajes fungiformes maciças quadradas com 2.00m de lado e 0.10m de espessura, reforçadas ao punçoamento com parafusos pré-esforçados. Os parafusos 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). Posteriormente à descarga da laje, foram executados os furos verticais para colocação de 8 parafusos dispostos numa camada em torno do pilar. Os parafusos foram depois pré-esforçados com uma força de 5.0 kN na laje PR1 e 15 kN na laje PR2.

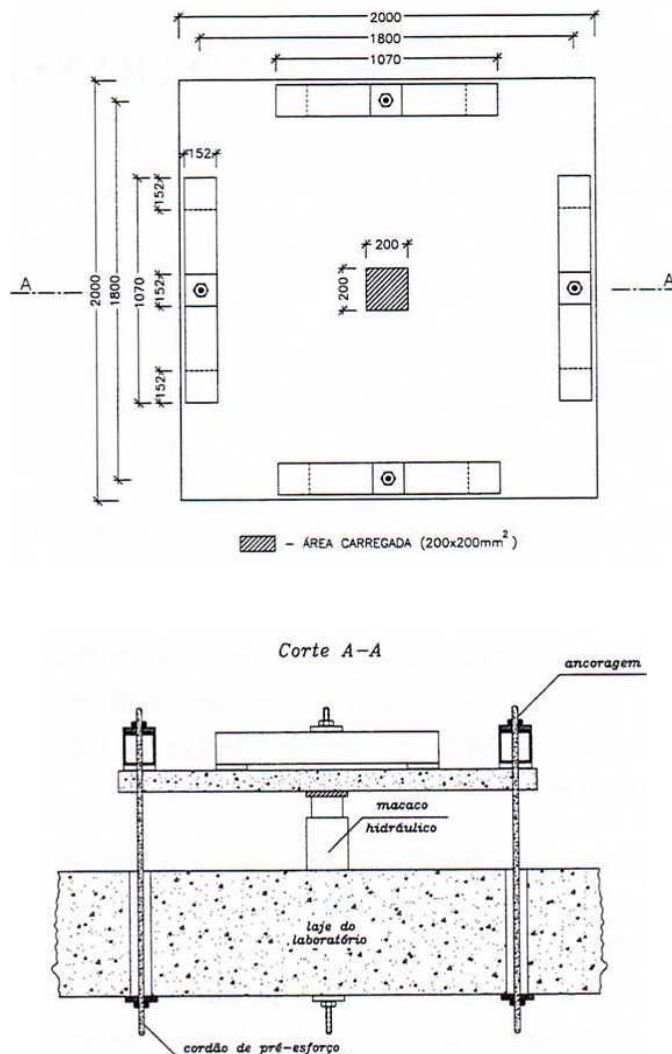


Fig. 14 – Geometria dos modelos PR1 e PR2

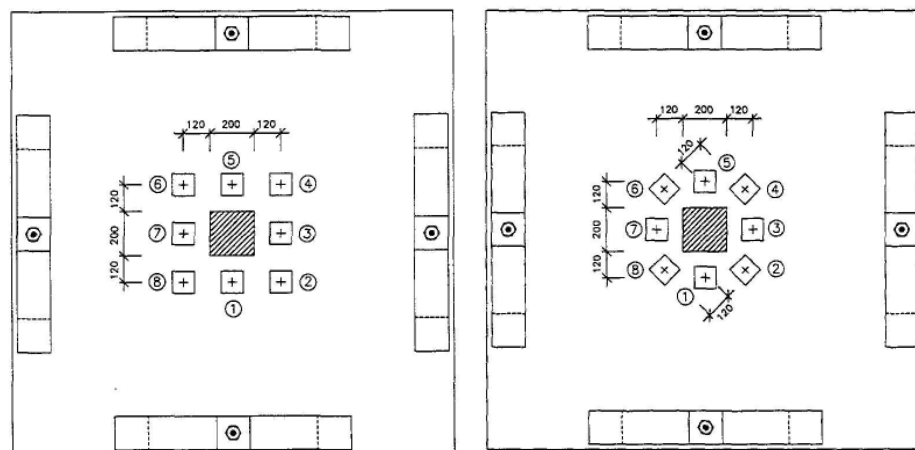


Fig. 15 – Geometria do reforço nos modelos PR1 e PR2, respectivamente

O autor constatou que no modelo PR1 a solicitação dos parafusos não foi uniforme, tendo-se verificado que os parafusos a meio dos lados (parafusos 1, 3, 5 e 7 da figura 15) foram mais solicitados que os que se encontram nos cantos. No modelo PR1, para a carga de 230 kN, a força no parafuso menos esforçado é cerca de 37% da do parafuso mais esforçado. Tal deve-se ao facto de, os parafusos que se encontram nos cantos estarem mais distantes do contorno do pilar. De referir ainda que os parafusos 1, 3 e 7 cederam na rotura.

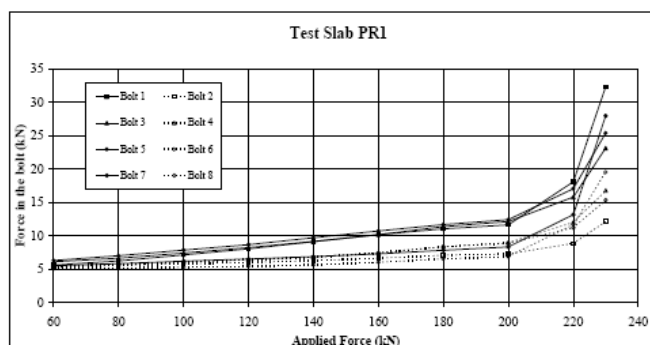


Fig. 16 – Evolução da força nos parafusos da laje PR1

No modelo PR2, os parafusos de canto foram aproximados do pilar. Com esta alteração verificou-se uma uniformização na distribuição dos parafusos. Para a carga de 250 kN, a força no parafuso menos esforçado é cerca de 77% da do parafuso mais esforçado. Neste modelo nenhum parafuso entrou em cedência.

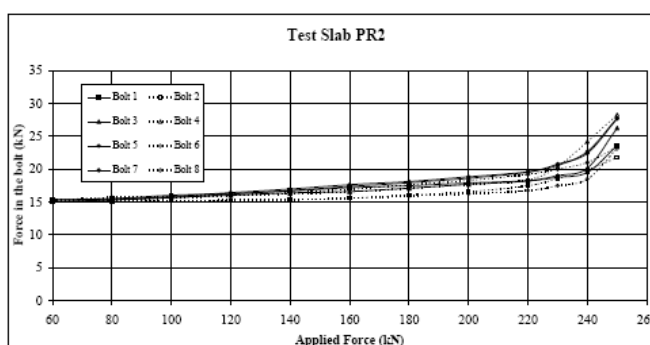


Fig. 17 – Evolução da força nos parafusos da laje PR2

No modelo PR1, obteve-se uma rotura cuja superfície passou internamente aos parafusos. A inclinação da superfície de rotura, em relação ao plano da laje foi de aproximadamente  $40^\circ$ . No modelo PR2, por sua vez, a superfície passou a intersectar a face em compressão fora das placas de ancoragem, sendo a inclinação da superfície de rotura de  $28^\circ$ .

A rotura do modelo PR1, segundo o autor, foi condicionada pela força de pré-esforço introduzida pelos parafusos, pois a resistência obtida é aproximadamente igual à soma da resistência prevista sem reforço com a força total de pré-esforço. No modelo PR2, devido ao valor de pré-esforço ser mais elevado forçou a que a rotura se desse por fora da zona de influência deste. Neste modelo, a rotura por punçoamento foi influenciada pela cedência das armaduras de flexão, uma vez que a resistência à flexão (calculada pelo método das linhas de rotura  $P_{Rm,flexão} = 266.5$  kN) é bastante próxima do valor obtido para a carga de rotura (250 kN).

O reforço ao punçoamento com parafusos pré-esforçados proporcionou um aumento médio de resistência de 21% no modelo PR1 e de 25% no modelo PR2, em relação à resistência prevista sem reforço.

#### 4.1.2 Ensaios de Inácio Duarte (2008)

Inácio Duarte [7,8] ensaiou cinco modelos de laje fungiforme com dimensões em planta de 1.80x1.80 m e espessura de 0.12 m, sendo uma das lajes a de referência (ID1), e as restantes quatro (ID2 a ID5) reforçadas com dezasseis parafusos transversais, obtidos de varões roscados, dispostos em duas camadas de oito em torno do pilar. As variáveis deste trabalho experimental foram a área transversal de armadura de reforço e o pré-esforço inicial aplicado aos parafusos.

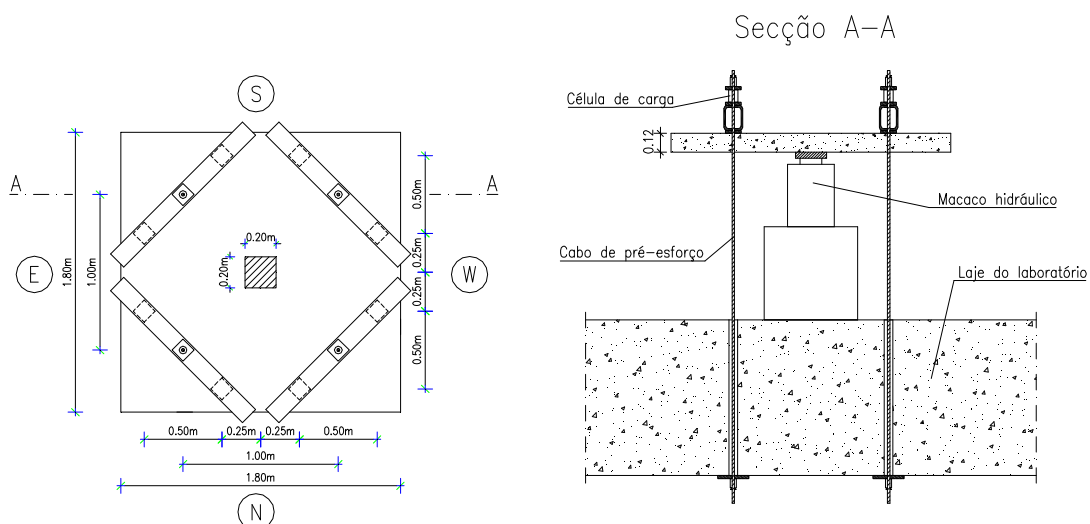


Fig. 18 – Definição geométrica dos modelos

Os modelos ID2 a ID5, numa primeira fase, foram carregadas, por intermédio de um macaco hidráulico, até se atingir uma força correspondente a cerca de 60 % da carga de rotura do modelo ID1. Após ter sido atingida esta carga efectuou-se a descarga das lajes e as operações de reparação. Na segunda fase foram colocados os parafusos transversais de reforço e ancorados às faces inferior e superior com placas de aço de dimensões 150x50 mm<sup>2</sup> e espessura de 5 mm. Nesta fase os modelos foram carregados até à rotura.

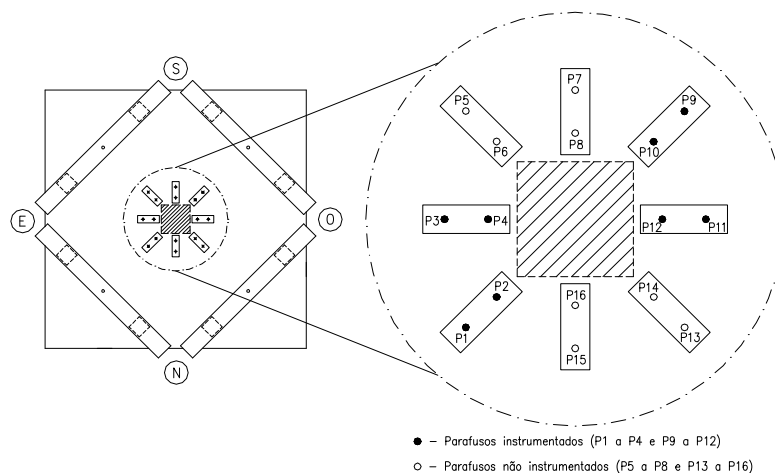
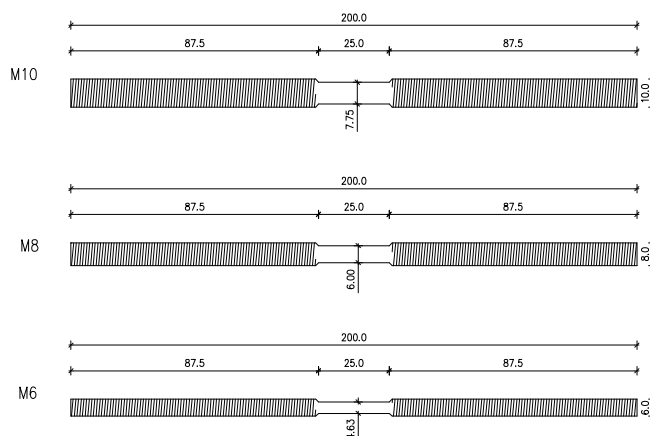


Fig. 19 – Esquema do reforço



**Fig. 20 – Geometria dos parafusos utilizados**

Destes resultados experimentais o autor conclui que a carga de rotura aumenta quando se utiliza parafusos de maior diâmetro, já que o reforço com parafusos M10 conduziu a um acréscimo de resistência de 51 %, enquanto que a utilização dos parafusos M8 conduziu a um aumento de 36 a 41%. Os parafusos M6 foram os que providenciaram menor acréscimo de resistência, cerca de 23%. Todos estes valores são em relação ao modelo de referência.

Com a utilização de parafusos M10 observou uma mudança da posição da superfície de rotura relativamente ao modelo de referência. A superfície passou a intersectar a face em compressão para além das placas de ancoragem

Relativamente à inclinação da superfície de rotura, verificou-se um aumento desta nos modelos reforçados com parafusos. Verificou-se também que as variáveis, o diâmetro dos parafusos e a quantidade de pré-esforço, não influenciaram significativamente a inclinação da superfície de rotura.

De um modo geral verificou que esta técnica de reforço é bastante eficaz no aumento da resistência ao punçoamento e é de simples e rápida execução.

#### **4.1.3 Ensaios de Marta Luís (2008)**

Marta Luís [9] ensaiou dois modelos, ML1 e ML2, em tudo idênticos aos modelos ID3 e ID4, mas sujeitos a carregamentos cíclicos. Os modos de rotura obtidos foram em tudo semelhantes aos dos ensaios de Inácio Duarte homólogos.

Os resultados experimentais obtidos foram comparados com os previstos usando o preconizado pelo EC2.

Da análise da tabela seguinte 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 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. Logo, o EC2 pode ser utilizado para dimensionamento deste tipo de reforço.

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).

A aplicação de parafusos de reforço aumenta a rigidez das lajes, reduzindo as deformações verticais.

Modelo	Parafuso de Reforço	Força inicial dos parafusos [kN]	Resultados Experimentais		Valores estimados pelo EC2				$V_{exp}$	$V_{exp}$
			$V_{exp}$ [kN]	Modo de rotura	$V_{Rm1}$ [kN]	$V_{Rm2}$ [kN]	$V_{Rm3}$ [kN]	Modo de rotura	$V_{Rm}$	$V_{Rm1}$
ID1	-	-	269	-	274	-	-	274	0.98	0.98
ID2	M10	11.2	406	Exterior ao reforço	272	439	396	Exterior ao reforço	1.02	1.49
ID3	M6	3.3	331	Interior ao reforço	298	308	430	Interior ao reforço	1.07	1.11
ID4	M8	5.9	381	Exterior ao reforço	300	367	432	Interior ao reforço	1.04	1.27
ID5	M8	1.4	366	Interior ao reforço	308	373	442	Interior ao reforço	0.98	1.19
ML1	M6	2.9	337	Interior ao reforço	290	310	418	Interior ao reforço	1.09	1.16
ML2	M8	6.7	349	Exterior ao reforço	292	419	422	Interior ao reforço	0.83	1.20

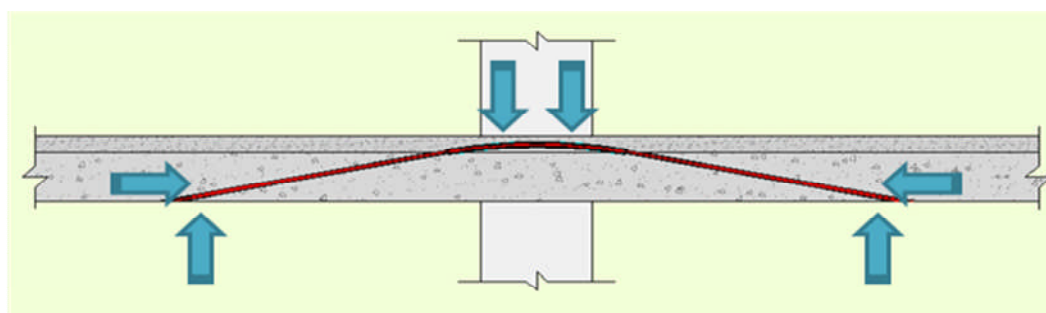
$V_{exp}$  – Carga de rotura experimental;  $V_{Rm,1}$  – Valor médio do esforço resistente ao punçoamento sem armaduras específicas;  $V_{Rm,2}$  – Valor médio do esforço resistente ao punçoamento com armaduras específicas (com limitação da tensão do aço dos parafusos);  $V_{Rm,3}$  – Valor médio do esforço resistente ao punçoamento considerando a rotura pelo exterior do reforço.

**Tabela 1 – Resumo dos ensaios experimentais de Marta Luís e Inácio Duarte (2008)**

## 4.2 REFORÇO DE LAJES COM PÓS-ESFORÇO USANDO ANCORAGENS POR ADERÊNCIA

### 4.2.1 Introdução

O objectivo deste estudo é o reforço de lajes fungiformes por introdução de pré-esforço (pós-tensão) usando ancoragens por aderência entre o cordão de aço de alta resistência e o betão. Este trabalho constitui o tema de doutoramento do Eng. Duarte Viúla Faria sob orientação de Válder Lúcio e de Pinho Ramos.



**Fig. 21 – Reforço de lajes fungiformes por introdução de pré-esforço usando ancoragens por aderência.**

Estas ancoragens são materializadas com um agente de aderência. Neste estudo tem sido usada uma resina epoxi da Hilti HIT-RE 500.

- **Vantagens do reforço com pós-tensão (sistema tradicional):**
  - O reforço é activo, isto é, funciona mesmo para as cargas já instaladas;
  - O elemento a reforçar não necessita ser descarregado;
  - Não adiciona peso significativo à estrutura;
  - Reduz a deformação e a fendilhação;
  - Reduz os esforços de flexão e de punçoamento por transferência de uma parte das cargas directamente para os apoios.
- **Desvantagens do reforço com pós-tensão (sistema tradicional):**
  - Provoca tensões concentradas nas zonas de ancoragem;
  - Usa ancoragens externas permanentes e desviadores que afectam a estética e o usam espaço útil.

#### **4.2.2 Descrição do sistema de pré-esforço com ancoragens por aderência**

O sistema consiste na instalação de pré-esforço com ancoragens realizadas por aderência entre o aço de pré-esforço e o betão. O sistema consiste na furação da peça de betão e instalação do aço dentro dos furos. O aço é então tensionado com a ajuda de ancoragens provisórias e os furos são selados e injectados com um agente de aderência.

Após a cura do agente de aderência o pré-esforço é libertado nas ancoragens provisórias e transferido por aderência para o betão nas zonas de ancoragem. Esta força é transferida por tensões de aderência entre o aço, o agente de aderência e o betão adjacente ao furo.

O sistema consta, assim, de um pré-esforço instalado à posteriori usando a técnica das ancoragens de pré-tensão. Este sistema pode ser usado no reforço de estruturas existentes e na ligação entre elementos de estruturas novas.

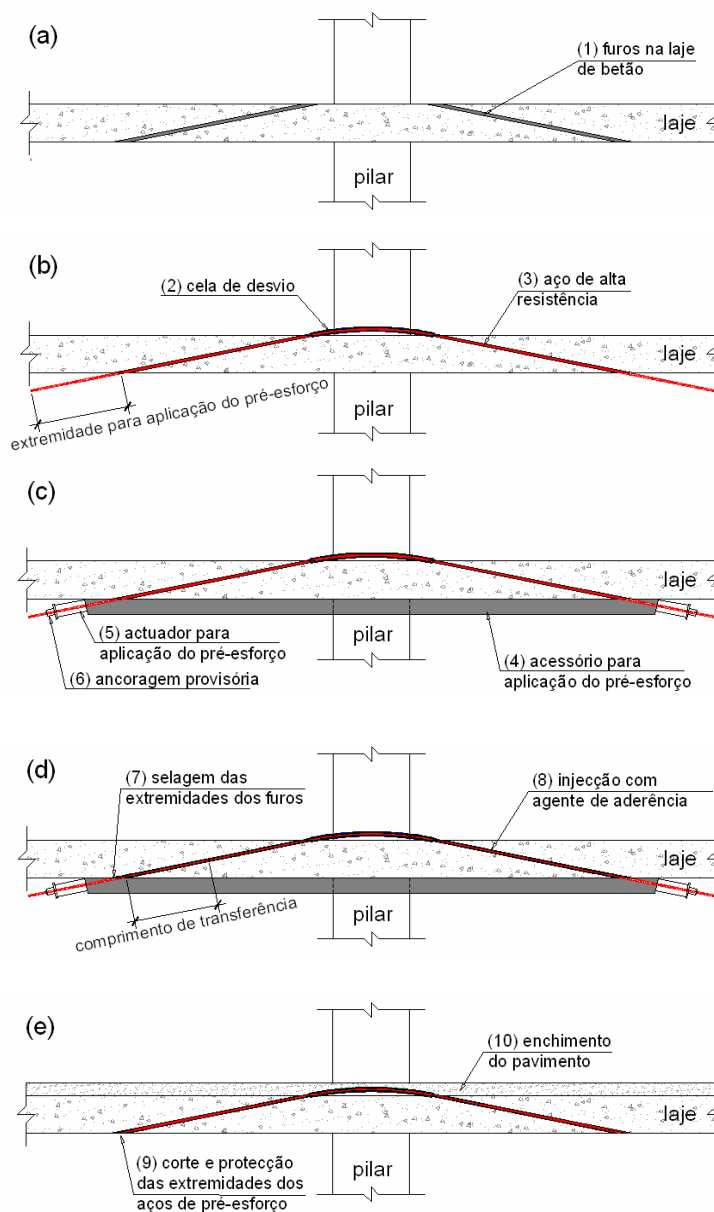
A sequência de aplicação do sistema é a seguinte (Fig. 22):

- (a) furação da laje existente;
- (b) instalação de cordões de aço de alta resistência;
- (c) tensionamento dos cordões com recurso a ancoragens provisórias;
- (d) injeção com um agente de aderência e seu endurecimento;
- (e) libertação das ancoragens provisórias e transferência do pré-esforço para o elemento.

#### **▪ Vantagens do sistema**

Este sistema adiciona as seguintes vantagens ao sistema tradicional de reforço com pré-esforço:

- Como não existem ancoragens permanentes o sistema é mais económico e fácil de instalar, não altera a estética e não compromete espaço;
- Enquanto no pré-esforço tradicional as forças na ancoragem são concentradas, neste sistema as tensões na zona da ancoragem são introduzidas gradualmente ao longo do comprimento de transferência, não causando concentração de tensões.



**Fig. 22 – Sequência da execução do reforço por introdução de pré-esforço usando ancoragens por aderência.**

#### 4.2.3 Desenvolvimento do sistema

Para o desenvolvimento do sistema necessitam ser analisados em detalhe os seguintes aspectos:

- Técnicas de furação do betão e de injeção de furos longos;
- As propriedades do agente de aderência;
- Sistemas de ancoragens provisórias e de tensionamento dos cordões de pré-esforço;
- As perdas de pré-esforço, designadamente as relativas à deformação instantânea e à deformação por fluência do agente de aderência;
- Explorar campos de aplicação para o sistema.

#### 4.2.4 Mecanismo de aderência

O maior desafio deste trabalho é conhecer o comportamento do mecanismo de aderência dos cordões de aço de alta resistência quando selado com o adesivo epoxídico. Os mecanismos que contribuem para a transferência por aderência são a adesão, o atrito e a acção mecânica. Após a perda da componente de adesão, a tensão de aderência continua aumentando e nesta fase a componente friccional é a mais importante. As tensões de compressão radiais que originam esta componente surgem principalmente do efeito de Poisson. É nesta fase que é também desenvolvida a acção mecânica devido à geometria do cordão, caracterizada pela forma helicoidal dos fios exteriores.

Para o estudo do mecanismo de aderência foram já efectuados ensaios de “pull-out” e de “push-in”.

Os ensaios “pull-out” pretendem simular o comportamento do cordão quando a tensão no cordão é elevada devido a um carregamento crescente na laje, até se atingir a rotura da mesma, quer seja por punçoamento ou por flexão.

O ensaio “push-in” pretende simular o comportamento do cordão quando a tensão, instalada no cordão antes de injectar o furo com adesivo, é transferida para o betão por aderência.

A partir destes ensaios é possível quantificar a máxima força inicial a aplicar no cordão de aço de alta resistência, tendo em conta o comprimento de selagem disponível.

Após estes ensaios foram realizados ensaios em lajes com o sistema proposto, com rotura prevista por punçoamento.

##### ▪ Ensaios de “pull-out”

Estes ensaios consistem no arrancamento de cordões de aço de alta resistência (7 fios, 15,2 mm de diâmetro e 1,4 cm<sup>2</sup> de secção transversal) quando introduzidos em furos executados em betão endurecido e selados com um adesivo, como se mostra na Figura 23.

Os furos foram efectuados com um martelo de percussão eléctrica usando brocas com 18mm de diâmetro, sendo o diâmetro do furo 18% superior ao do cordão. O furo foi devidamente limpo usando uma escova e um soprador manual.

Os furos foram executados com 30 cm de profundidade e foram feitas três séries de ensaios: selagem com 10 cm, com 15 cm e com 20 cm.

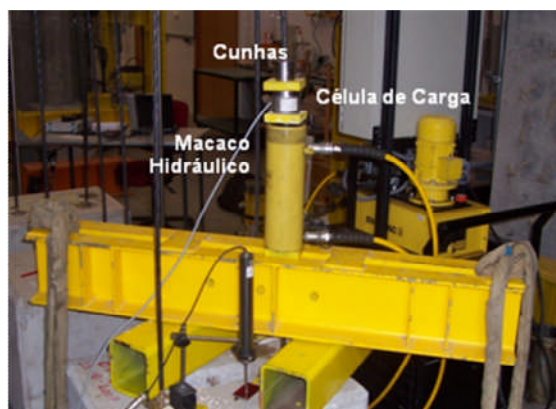
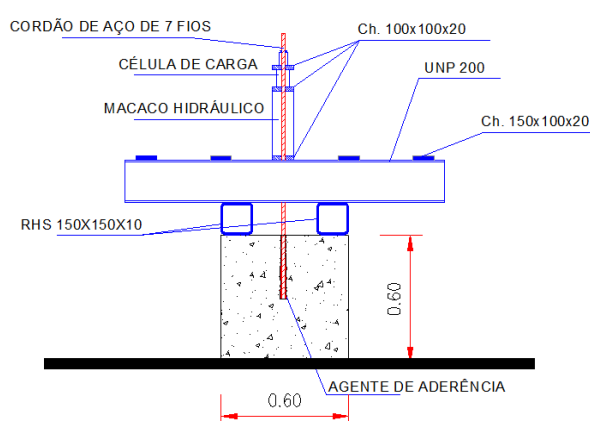


Fig. 23 – Ensaios de Pull-out.

Durante os ensaios pode-se observar a olho nu o deslizamento do cordão de uma forma rotacional helicoidal, na interface cordão de acordo com a forma da superfície do cordão, tal como seria de esperar visto que o adesivo tomou aquela forma durante a cura.



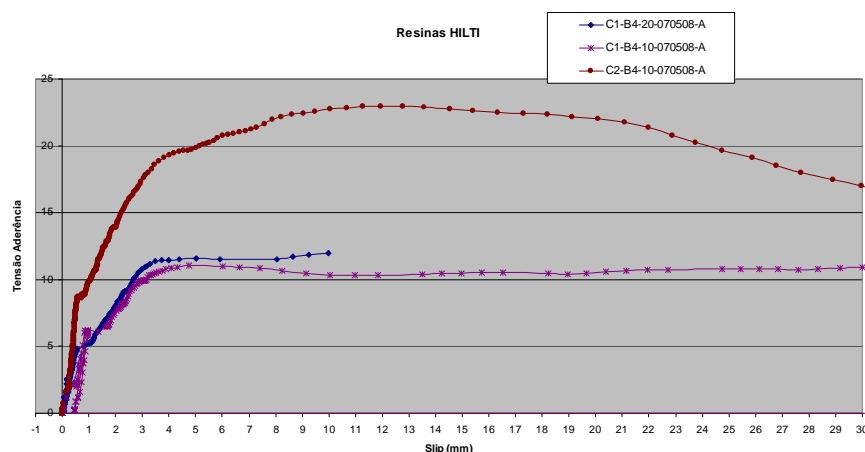


Fig. 24 – Curva Tensão de aderência-slip (Pull-out).

De acordo com Cook et al. [10] e Krishnamurthy [11] pode ser admitida uma distribuição constante das tensões de aderência ao longo do comprimento de selagem quando usada uma armadura ordinária, sendo portanto razoável admitir o mesmo neste caso. Também, de acordo com aqueles autores é possível usar o diâmetro do cordão em vez do diâmetro do furo devido à pouca diferença entre estes.

Assim, os valores das tensões de aderência podem ser obtidos da seguinte forma:

$$\tau = \frac{N}{\pi d h}$$

Onde N representa a carga aplicada, d o diâmetro nominal do cordão e h o comprimento de selagem.

De acordo com o exposto anteriormente e com base nos resultados experimentais, para efeitos da determinação da resistência máxima das ancoragens podem ser consideradas tensões de aderência de cerca de 12MPa, embora com deformações significativas.

#### ▪ Ensaios de “push-in”

Estes ensaios consistem na furação de um bloco e introdução nesse mesmo furo de cordões de aço de alta resistência (7 fios, 15,2 mm de diâmetro e 1,4 cm<sup>2</sup> de secção transversal). Posteriormente, o cordão é tensionado entre as duas extremidades e o espaço entre o cordão e o furo preenchido com adesivo. Após cura do adesivo, o cordão é distensionado de um dos lados, sendo a força medida na extremidade oposta parcela que é suportada por aderência. O furo foi realizado usando o mesmo procedimento que nos ensaios de “pull-out”.

Foram ensaiados vários comprimentos de selagem: 250 mm, 350 mm, 450 mm, 550 mm, 650 mm e 800 mm.

De acordo com o exposto anteriormente e com base nos resultados experimentais, para efeitos de dimensionamento dos comprimentos de transferência do pré-esforço nas zonas de ancoragem podem ser usadas tensões de aderência máximas da ordem de 6MPa.

#### 4.2.5 Modelos de laje fungiforme

Foram executados e ensaiados 7 lajes com 2300x2300mm, sendo 3 com 100mm de espessura e 4 com 120mm de espessura. Para referência e comparação dos resultados experimentais, foi ensaiada uma laje não reforçada de cada uma das espessuras.

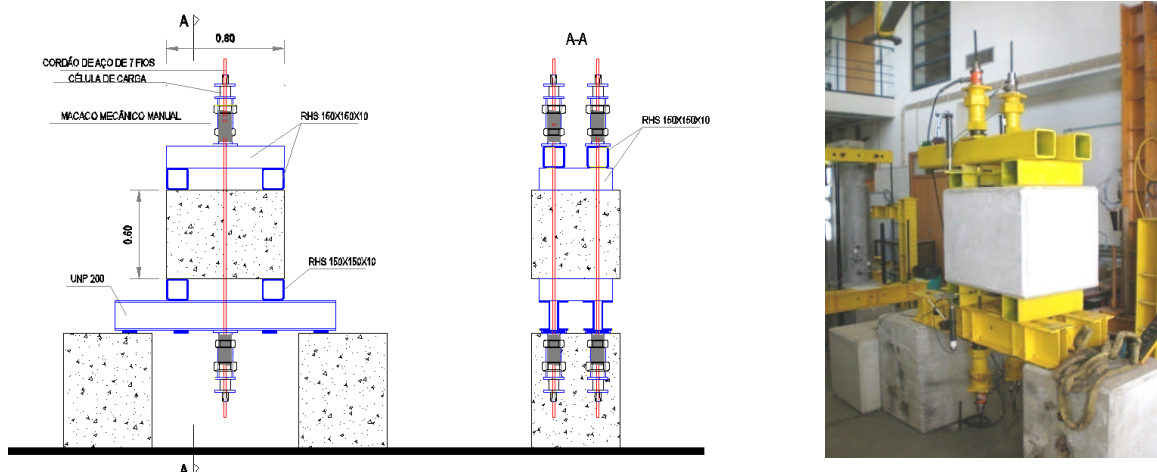


Fig. 25 – Ensaios de Push-in.

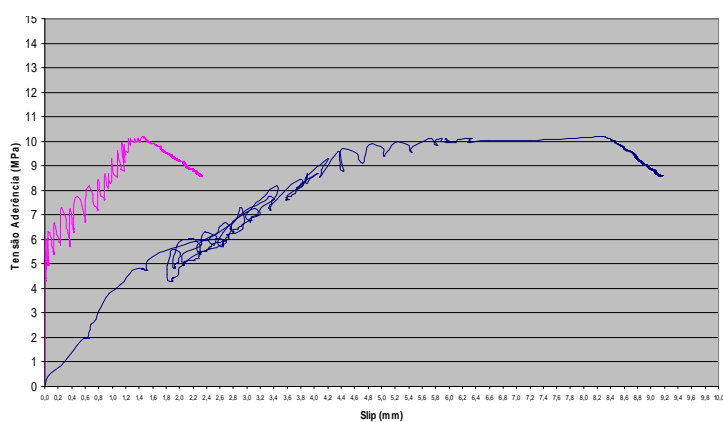


Fig. 26 – Curva Tensão de aderência-slip (Push-in).

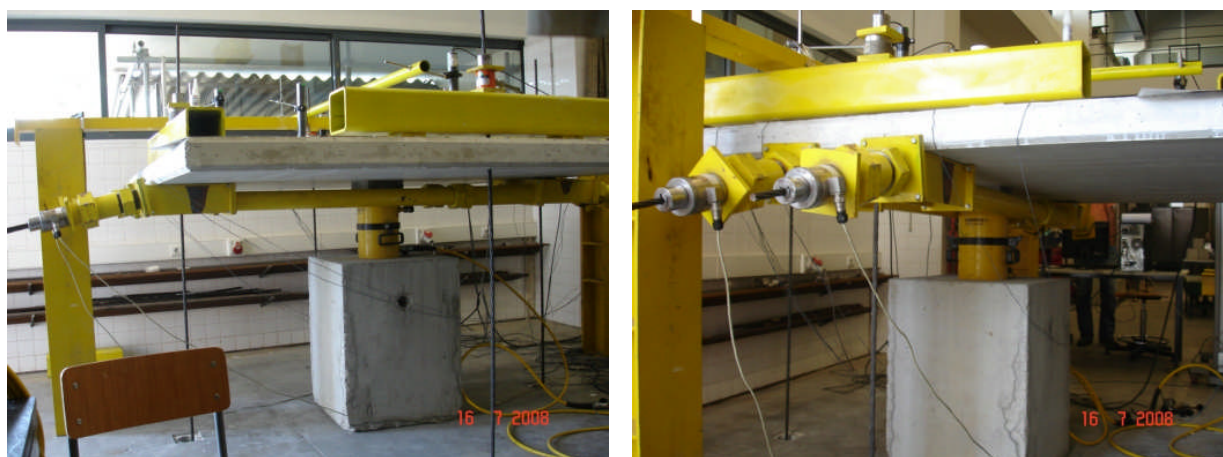


Fig. 27 – Sistema de ancoragens provisórias para aplicação do pré-esforço e injeção da resina.

A armadura longitudinal inferior da laje consistia numa malha quadrada de diâmetros de 6mm espaçados de 200 mm, e a armadura longitudinal superior da laje numa malha quadrada de diâmetros de 10 mm espaçados de 60 mm nas lajes com 100 mm de espessura e diâmetros de 10 mm espaçados de 75 mm nas lajes com 120 mm de espessura. O pilar foi simulado com uma chapa de aço com 200mmx200mm e 50mm de

espessura. Os deslocamentos verticais das lajes e extensões em três varões da armadura longitudinal superior foram monitorizados usando deflectómetros e extensómetros, respectivamente. A magnitude da força aplicada foi medida através de 4 células de carga posicionadas nos 4 cordões que ligavam a laje ao piso do laboratório.

As forças nos cordões de reforço também foram monitorizadas no decorrer dos ensaios. As lajes reforçadas atingiram maiores cargas de rotura e apresentam menores deformações e redução de fendilhação que as lajes de referência. O posicionamento dos cordões foi escolhido de acordo com os resultados obtidos por Ramos [12,13], a cerca de 50 mm da face do pilar ( $\approx dp/2$ ).

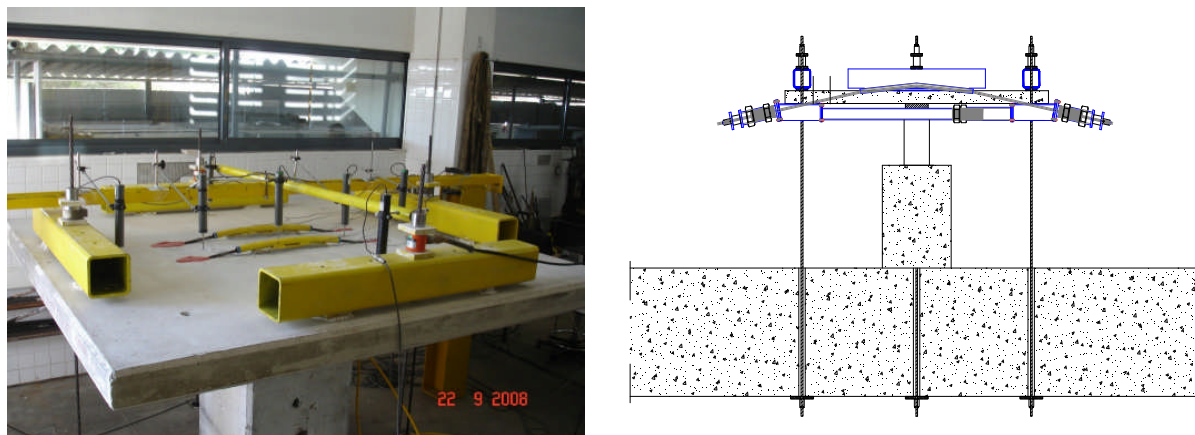


Fig. 28 – Laje reforçada pronta para ensaiar.

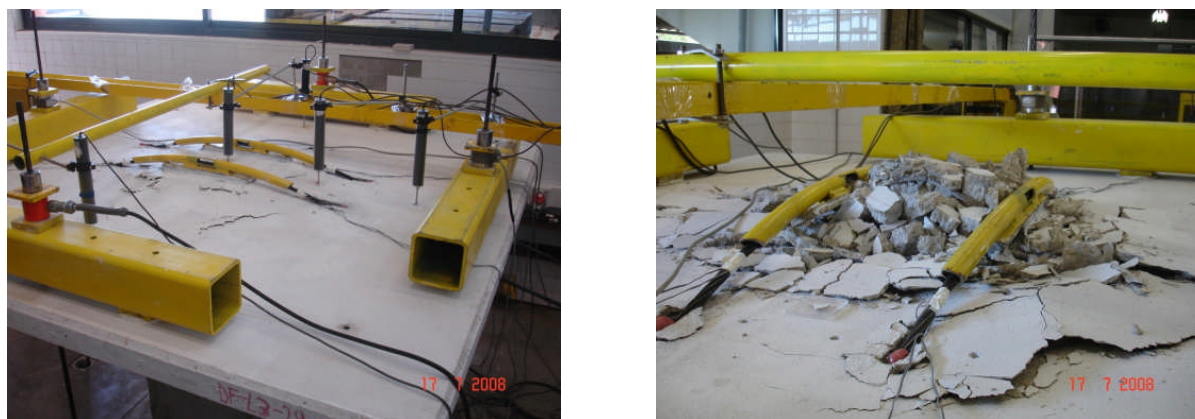


Fig. 29 – Rotura por punção de uma laje reforçada com pré-esforço pós instalado (esq), e respectiva pós-rotura (dir).

#### 4.2.6 Resultados dos ensaios das lajes

A tabela seguinte apresenta os resultados obtidos experimentalmente e compara-os com os valores estimados usando o EC2. Na quantificação da resistência ao punção foram usados os valores médios de resistência dos materiais, sem coeficientes de segurança.

Pode-se verificar que os valores obtidos usando o EC2 são muito próximos dos obtidos experimentalmente.

Espessura da laje [m]	Modelo	$V_{desvio}$ [kN]	$V_{exp}$ [kN]	$V_{eff}$ [kN]	$V_{Rm,EC2}$ [kN]	$V_{eff}/V_{Rm}$	$V_{exp}/V_{exp,REF}$
0.10	L1	REF	191.0	191.0	203.6	0.94	1.00
	L2	60.2	272.9	212.7	201.6	1.06	1.43
	L3	52.7	254.7	202.0	198.5	1.02	1.33
0.12	L4	REF	199.0	199.0	217.4	0.92	1.00
	L5	72.0	294.5	222.5	214.1	1.04	1.48
	L6	77.4	292.2	214.8	212.5	1.01	1.47

$V_{desv}$  – componente vertical das forças de pré-esforço nas ancoragens

$V_{exp}$  – força de rotura obtida nos ensaios experimentais

$V_{eff} = V_{exp} - V_{desv}$

$V_{Rm,EC2}$  - Resistência estimada com o EC2, usando valores médios das propriedades dos materiais

**Tabela 2 – Resultados dos ensaios das lajes.**

#### 4.2.7 Conclusões provisórias

Os ensaios de aderência mostraram que, para efeitos de dimensionamento dos comprimentos de transferência do pré-esforço nas zonas de ancoragem podem ser usadas tensões de aderência máximas da ordem de 6MPa;

Para efeitos de determinação da resistência máxima das ancoragens podem ser consideradas tensões de aderência de cerca de 12MPa, embora com deformações significativas;

As perdas instantâneas de pré-esforço, obtidas com comprimentos de ancoragem de cerca de 0.35m, correspondem a deslizamentos inferiores a 0.5mm, essencialmente devidos à deformação da resina na fase de transferência do pré-esforço;

Existem perdas de pré-esforço por fluência da resina, que estão neste momento a ser quantificadas experimentalmente, mas que são compatíveis com os resultados pretendidos;

Dos resultados dos ensaios já realizados em modelos de laje pode-se afirmar que:

- A solução de reforço permitiu o incremento da resistência ao punçoamento em 33% a 48%, com pré-esforço apenas numa direcção;
- O pré-esforço reduz as deformações verticais da laje;
- Pode ser usado o EC2 para estimar a resistência ao punçoamento com este reforço.

## 5 REFERÊNCIAS

- [1] Lúcio, V.J.G.: Waffle slab structures under vertical and horizontal loading, Tese submetida para o grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Técnica de Lisboa, 1991.
- [2] Lamas, A.R.G., Lúcio, V.J.G.: Acções horizontais em edifícios de lajes fungiformes, largura efectiva de laje para a análise de pórticos equivalentes, Revista Portuguesa de Eng. de Estruturas, nº 18, 1983, pp 314-319.
- [3] Lúcio, V.J.G., Regan, P.E.: Behaviour of waffle flat slabs under horizontal load, Structural Concrete, IABSE Report, Volume 62, Mar. 1991, Suíça.

- [4] Ramos, A. M. P. e Lúcio, V.: Post-Punching Behaviour of Prestressed Concrete Flat Slabs. Magazine of Concrete Research, Volume: 60, Issue: 4, Pps: 245 – 251; Thomas Telford, Maio de 2008.
- [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, June de 2000.
- [7] Duarte, I.: Comportamento ao Punçoamento de Lajes Fungiformes Reforçadas com Parafusos, Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2008.
- [8] 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.
- [9] Luis, M. e Ramos, A.: Estudo Experimental do Punçoamento Cíclico em Lajes Fungiformes Reforçadas com Pré-Esforço Transversal, Encontro Nacional Betão Estrutural 2008, Guimarães, Novembro, 2008.
- [10] Cook, R.A. & Kunz, J. & Fuchs, W. & Konz, R.C.: Behaviour and Design of Single Adhesive Anchors under Tensile Load in Uncracked Concrete. *ACI Structural Journal* 95(S2): 9-25, 1998.
- [11] Krishnamurthy, K. 1996. *Development of a Viscoplastic Consistent Tangent FEM Model with Applications to Adhesive Bonded Anchors. Tese Doutorado*, Gainesville, University of Florida, 1996.
- [12] Ramos, A.M.P.; Lúcio, V.J.G.; Resistência ao punçoamento de lajes fungiformes pré-esforçadas, Método alternativo de cálculo; Revista Internacional Construlink, nº 12 de 2006, Vol. 4.
- [13] Ramos, A. M. P. e Lúcio, V. Discussion of Punching of Post-Tensioned Slabs – Tests and Codes. *ACI Structural Journal*, D104-S13, Vol. 105, No. 1, Jan-Fev, 2008.

