



Departamento de Engenharia Civil

***Efeito da Aderência na Resistência ao Punçamento de Lajes
Fungiformes Reforçadas com Parafusos Transversais***

Jorge Miguel Neves Guarda Gomes

(Licenciado)

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientador Científico: Professor Doutor António Pinho Ramos

Lisboa

2010

Punçamento de Lajes Fungiformes Reforçadas com Pré-Esforço Transversal Aderente e Não Aderente

RESUMO

Apresenta-se neste trabalho uma descrição do estudo experimental, levado a cabo em modelos de laje fungiforme maciça de betão armado à escala reduzida, para estudo da técnica de reforço com recurso a parafusos pré-esforçados pós-instalados. Nesta campanha experimental foram executados e ensaiados cinco modelos. Quatro destes modelos foram reforçados com a introdução de parafusos roscados verticais pré-esforçados, sendo dois do tipo aderente. O restante foi utilizado como modelo de referência, não reforçado. Como objectivos, este estudo pretendia verificar as alterações de comportamento, modo de rotura e resistência em modelos com armadura específica de punçamento pós-instalada aderente e não aderente.

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, sendo posteriormente pré-esforçados com um valor pré-definido. Em dois dos modelos, o espaço entre o furo e o parafuso foi preenchido com uma resina epoxídica. Por fim, todos os modelos foram sujeitos a carregamentos monotónicos crescentes até ser atingida a rotura por punçamento.

Os resultados experimentais obtidos são comparados com os valores previstos, usando o preconizado pelo EC2 [8] e o ACI 318 – 08 [1].

Cyclic Punching of Flat Slabs Strengthened with Transverse Prestressing

ABSTRACT

We present here a description of the experimental study carried out in reduced scale reinforced concrete models of flat slab, to study the technique of strengthening using post-installed pre-stressed vertical bolts. In this experimental campaign were made and tested five models. Four of these models have been strengthened with the introduction of vertical bolts pre-stressed, two non-adherent and the other two adherents. The fifth model was used as a reference model. As objectives, this study intended to verify the changes in behaviour and punching capacity. The tests were conducted in two phases. Initially, the models were loaded to achieve a state of considerable cracking (corresponding to about 60 % of the ultimate load of the reference model). Then the models were unloaded and strengthened through the placement of 16 bolts, arranged in two layers around the column, after which were pre-stressed. In two of the models, the space between the hole and the bolt was filled with an epoxy resin. Finally, all models were subjected to monotonic loading increasing up until failure by punching.

The experimental results are compared with predicted values, using the recommended by EC2 [8] and ACI 318 – 08 [1].

PALAVRAS-CHAVE

Punçoamento

Laje fungiforme

Betão armado

Pré-esforço

Reforço e reparação

Análise experimental

Comportamento na rotura

KEY WORDS

Punching

Flat slab

Reinforced concrete

Prestress

Strengthening and repair

Experimental analysis

Punching behaviour

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho não poderia ter sido concretizado sem a preciosa e imprescindível ajuda de algumas pessoas e entidades, pelo que deixo aqui o meu reconhecimento e a minha gratidão, particularmente:

□ Ao Professor Doutor António Pinho Ramos, meu Orientador Científico, pela inteira disponibilidade e amizade, apoio e colaboração, manifestados ao longo de todo o meu percurso académico; pelas suas sábias palavras e ensinamentos que motivaram a realização e concretização deste trabalho. Foi e é uma pessoa extraordinária.

«Um tiro de longo alcance é tanto melhor quanto melhor for o "Spotter".»

□ Ao Professor Doutor Válder Lúcio, ao Professor Doutor António Batista e ao Professor Duarte Faria, por toda a colaboração, amizade e disponibilidade, manifestadas ao longo destes últimos anos; por terem despertado em mim o gosto pelas estruturas, especialmente as de betão armado; pelos seus ensinamentos que muito me têm ajudado na minha vida profissional, bem como na realização deste trabalho.

□ Ao Departamento de Engenharia Civil, da Faculdade de Ciências e Tecnologia, da Universidade Nova de Lisboa, pelo apoio concedido nos meios colocados à minha disposição.

□ Ao pessoal Técnico do Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais, especialmente ao Sr. Gaspar e ao Sr. Jorge, pela ajuda e disponibilidade na preparação dos modelos, em todas as suas fases.

□ À empresa CONCREMAT S.A., pelo fornecimento dos modelos ensaiados.

□ À empresa HILTI, pelos kits de resina epoxídica fornecidos.

□ À Professora Ana Paula Cunha, pela amizade e disponibilidade dispensadas na revisão linguística do texto deste trabalho.

□ À minha família e amigos, pela compreensão, apoio e incentivo mostrados.

□ À Cláudia, por todo o apoio e carinho; por toda a paciência e compreensão manifestadas, apesar do pouco tempo que lhe dediquei nestes últimos tempos; pela sua bondade e preciosa ajuda, especialmente na fase final deste trabalho.

□ A todos os que, de forma directa ou indirecta, colaboraram e tornaram possível a realização deste trabalho e que, por lapso ou esquecimento, não foram citados.

Que todos encontrem aqui a expressão do meu mais sincero reconhecimento.

GLOSSÁRIO DE NOTAÇÃO

Minúsculas

b_x	dimensão do perímetro crítico na direcção x
b_y	dimensão do perímetro crítico na direcção y
d	altura útil da laje
f_{be}	tensão inicial dos parafusos
f_c	tensão de rotura por compressão da carote
f'_c	resistência do betão à compressão para cada um dos modelos
f_{ccm}	tensão média de rotura à compressão do betão em provetes cúbicos
f_{cd}	valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão
f_{ck}	tensão característica de rotura à compressão do betão em provetes cilíndricos
f_{cm}	valor médio da tensão de rotura à compressão do betão em provetes cilíndricos
$\overline{f_{cm}}$	média das resistências à compressão do betão de todos os modelos
$f_{cm,i}$	resistência à compressão do modelo i
f_{ctk}	valor característico da tensão de rotura à tracção do betão
f_{ctm}	tensão média de rotura à tracção do betão
$f_{p0.2}$	tensão limite convencional de proporcionalidade a 0.2% do aço
f_{pc}	valores de tensão de rotura à compressão do betão polimérico
$f_{pc,m}$	tensão média de rotura à compressão
f_{pct}	valores de tensão de rotura à tracção do betão polimérico
$f_{pct,m}$	tensão média de rotura à tracção por flexão
f_{su}	tensão de rotura do aço
f_{sy}	tensão de cedência do aço
$f_{sy,ef}$	tensão efectiva de cedência do aço
f_{syd}	valor de cálculo da tensão de cedência do aço
$f_{syd,ef}$	valor de cálculo da tensão efectiva de cedência do aço
f_{syk}	tensão característica de cedência do aço
f_{su}	tensão de rotura à tracção do aço

f_{ywd}	valor de cálculo da tensão de cedência das armaduras de esforço transverso
$f_{ywd,ef}$	valor de cálculo da tensão efectiva de cedência das armaduras de esforço transverso
h	altura da laje
k	factor de escala
r	largura do pilar central onde é aplicada a força
s	espaçamento entre as armaduras
s_r	afastamento radial entre camadas de armadura
u, u^*	perímetro do contorno de referência
u_0	perímetro da área carregada
V_{Ed}	máxima tensão de corte por punçoamento
$V_{Rd,c}$	tensão de corte correspondente à resistência ao punçoamento num perímetro de controle, calculado sem armadura específica
$V_{Rd,cs}$	tensão de corte correspondente à resistência ao punçoamento num perímetro de controle, calculado com armadura específica
$w (F_b (max))$	deformação máxima da laje correspondente à força máxima dos parafusos
$w (V_{exp})$	deslocamento vertical correspondente à carga de rotura

Maiúsculas

A	área da secção
A_c	área transversal da laje
A_s	área de armadura ordinária
A_{sw}	área transversal da armadura específica de punçoamento
$A_{sw,a}$	área transversal de um perímetro de armaduras específicas de punçoamento em torno do pilar
$A_{sw,b}$	área transversal de um parafuso de reforço
A_0	área transversal do pilar ou zona carregada
B	largura do pilar ou área carregada
E	módulo de elasticidade
E_m	módulo de elasticidade médio
E_c	módulo de elasticidade do betão
E_s	módulo de elasticidade do aço

F	valor da carga aplicada ao modelo
F_b	valor da carga aplicada ao parafuso
F_b (max)	força máxima nos parafusos
F_f	força final aplicada aos parafusos
F_i	força inicial aplicada aos parafusos
$F_{P0.2}$	força limite convencional de proporcionalidade a 0.2% média do aço dos parafusos
F_u	força de rotura à tracção do aço dos parafusos
M_0	momento de descompressão da secção
M_{sd}	valor de cálculo do momento actuante
N	esforço normal
N_{Ed}	esforço axial actuante
P	valor da carga aplicada ao modelo
P_0	valor da força instalada nos parafusos
P_u	valor da carga última aplicada ao modelo
R	modelo de laje de referência
S_0	secção transversal dos parafusos na zona central sem rosca
S_r	afastamento radial entre camadas de armadura
V	carga vertical
V_c	contribuição para a resistência ao punçoamento do betão
V_{dow}	efeito de ferrolho
V_{eff}	força efectiva de punçoamento
V_{exp}	valor experimental da carga de rotura
$V_{exp,n}$	valor experimental da carga de rotura normalizada
$V_{flexão}$	valor de carga de rotura de flexão de cálculo
V_i	carga de rotura correspondente ao modelo i
V_{IDi}	carga de rotura correspondente ao modelo i
V_{ID1}	carga de rotura do modelo ID1 (referência)
V_{norm}	valor de carga de rotura experimental normalizado, com ou sem armadura específica
V_{prt}	projecção vertical da força nos cabos de pré-esforço
V_R	carga de rotura do modelo referência (R)
V_{Rd}	valor de cálculo do esforço resistente de punçoamento
$V_{Rd,c}$	valor de cálculo da resistência ao punçoamento sem armadura específica

$V_{Rd,s}$	valor de cálculo da parcela da armadura no cálculo da carga de rotura normalizada, considerando a parcela do betão e da armadura
V_{Rm}	valor médio do esforço resistente ao punçoamento
$V_{Rm,1}$	valor médio do esforço resistente ao punçoamento sem armaduras específicas
$V_{Rm,2}$	valor médio do esforço resistente ao punçoamento com armaduras específicas, com ou sem limitação da tensão no aço dos parafusos
$V_{Rm,3}$	valor médio do esforço resistente ao punçoamento, caso a rotura ocorra fora do perímetro do reforço
$V_{Rm,f}$	valor médio da carga de rotura à flexão
V_S	representa a contribuição dos parafusos no punçoamento resistente
V_{sd}	valor de cálculo do esforço de punçoamento actuante
V_{sti}	força vertical nas armaduras específicas de punçoamento
W	deslocamento vertical

Gregas

α	ângulo formado pelas armaduras específicas de punçoamento com o plano da laje
β_c	quociente entre o lado maior e o lado menor do pilar
ϵ_{cr}	extensão correspondente ao início da fendilhação
$\epsilon_{m\acute{a}x}$	extensão máxima
$\epsilon_{m\acute{e}d}$	extensão média
ϵ_{pc}	extensão de rotura do betão polimérico
$\epsilon_{pc,m}$	extensão média na rotura do betão polimérico
ϵ_{pct}	extensão de rotura do betão polimérico
$\epsilon_{pct,m}$	extensão média na rotura
ϵ_{sy}	extensão de cedência do aço nas armaduras longitudinais superiores
\emptyset_c	coeficiente de segurança do betão
\emptyset	diâmetro da armadura
γ	peso volúmico do betão
γ_c	coeficiente de segurança do betão

γ_s	coeficiente de segurança do aço
ν	coeficiente de Poisson
ρ	percentagem geométrica de armadura
ρ_l	percentagem geométrica de armadura de flexão
ρ_{lx}	percentagem geométrica de armadura de flexão na direcção x
ρ_{ly}	percentagem geométrica de armadura de flexão na direcção y
ρ_{lz}	percentagem geométrica de armadura de flexão na direcção z
$\sigma_{p0.2}$	tensão limite convencional de proporcionalidade a 0.2% média do aço dos parafusos
σ_s	tensão de tracção na armadura ordinária
σ_u	tensão de rotura à tracção média dos parafusos

Abreviaturas

ACI	Instituto Americano de Betão (do inglês «American Concrete Institute»)
CEB	Comité Euro-Internacional de Betão (do francês «Comité Euro-International du Béton»)
CEN	Comité Europeu de Normalização (do francês «Comité Européen de Normalisation»)
CFRP	Polímeros (ou compósitos) reforçados com fibras de carbono (do inglês «Carbon Fiber Reinforced Polymers»)
CSCT	Teoria da carga última, por A. Muttoni, (do inglês «Critical Shear Crack Theory»)
EC2	Eurocódigo 2
FIB	Federação Internacional de Betão (do francês «Fédération Internationale du Béton»)
FIP	Federação Internacional de Pré-esforço (do francês «Fédération Internationale de la Précontrainte»)
FRP	Família dos polímeros (ou compósitos) reforçados com fibras contínuas (do inglês Fiber Reinforced Polymers)
GFRP	Polímeros (ou compósitos) reforçados com fibras de vidro (do inglês «Glass Fiber Reinforced Polymers»)
IPQ	Instituto Português da Qualidade

REBAP Regulamento de Estruturas em Betão Armado e Pré-esforçado
SAI Sociedade Suíça de Arquitectos e Engenheiros (do inglês «Swiss Society of
Engineers and Architects»)

ÍNDICE GERAL

RESUMO	i
ABSTRACT	iii
AGRADECIMENTOS	vii
GLOSSÁRIO DE NOTAÇÃO	ix
ÍNDICE GERAL	xv
LISTA DE FIGURAS	xix
LISTA DE TABELAS	xxv
Capítulo 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 Aspectos Gerais	1
1.2 Objectivos	1
1.3 Organização da Dissertação	2
Capítulo 2	3
ESTADO ACTUAL DO PROBLEMA	3
2.1 Introdução	3
2.2 Mecanismos de Rotura ao Punçoamento	4
2.3 Técnicas de Reparação e Reforço de Lajes Fungiformes	7
2.3.1 Reparação por Reposição do Betão	8
2.3.2 Reforço por Espessamento da Laje	8
2.3.3 Reforço através de Chapas Coladas (armadura externa)	9
2.3.4 Reforço através de Lâminas de Polímero reforçadas com Fibras (armadura externa) 10	
2.3.5 Reforço pelo Aumento da Secção do Pilar	11
2.3.6 Reforço por Adição de Capitel de Betão	12
2.3.7 Reforço por Adição de Capitel Metálico	12
2.3.8 Reforço Recorrendo a Pré-esforço Exterior	13
2.3.9 Reforço recorrendo a Armadura Transversal pós-instalada	15
2.4 Ensaaios Experimentais	16
2.4.1 Ensaaios de Ghali	16
2.4.2 Ensaaios de Ramos	17
2.4.3 Ensaaios de Menétrey e Brühwiler	19

2.4.4	Ensaio de El-Salakawy, Soudki e Polak	22
2.4.5	Ensaio de Harajli, Soudki e Kudsi	27
2.4.6	Ensaio de Inácio Duarte	30
2.4.7	Ensaio de Marta Luís	35
2.4.8	Ensaio de Aurello Muttoni	40
2.5	Regulamentação.....	49
2.5.1	REBAP	49
2.5.2	CEB-FIP Model Code de 1990	50
2.5.3	ACI 318 – 08	52
2.5.4	Eurocódigo 2	53
Capítulo 3	55
O EFEITO DA ADERÊNCIA NA RESISTÊNCIA AO PUNÇAMENTO.....		55
3.1	Introdução	55
3.2	Descrição dos Modelos Ensaiaados	55
3.3	Condições de Fronteira e Carregamento	58
3.4	Caracterização dos Materiais	58
3.4.1	Betão.....	58
3.4.2	Armadura Longitudinal	60
3.4.3	Parafusos de Reforço.....	61
3.4.4	Agente de Aderência	62
3.5	Instrumentação dos Ensaio.....	64
3.6	Execução dos Ensaio.....	68
3.6.1	Modelo de Referência (R)	68
3.6.2	Modelos Reforçados.....	69
3.7	Análise de Resultados.....	73
3.7.1	Extensões na Armadura Longitudinal Superior	73
3.7.2	Deslocamentos Verticais	87
3.7.3	Evolução da força nos parafusos de reforço.....	95
3.7.4	Comportamento na rotura.....	101
3.8	Cargas de rotura experimentais	103
3.8.1	EC2.....	106
3.8.2	ACI 318 – 08	108
3.8.3	Resumo.....	109

3.9	Inclinação das Superfícies de Rótura.....	111
Capítulo 4		115
CONCLUSÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS		115
4.1	Introdução	115
4.2	O Efeito de Resinas na Resistência ao Punçamento de modelos Reforçados com Parafusos Verticais Pré-esforçados.....	116
4.2.1	Extensões nas armaduras longitudinais superiores	116
4.2.2	Deslocamentos verticais.....	117
4.2.3	Evolução da força nos parafusos de reforço.....	117
4.2.4	Cargas e modos de rotura ao punçamento.....	118
4.2.5	Inclinação da superfície de rotura	119
4.3	Conclusões finais	119
4.4	Desenvolvimentos futuros	121
ANEXO.....		123
a.	INTRODUÇÃO.....	123
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		131

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Centro Comercial Sampoong de Seúl, Coreia [20]	3
Figura 2.2 – Abatimento total do Centro Comercial Sampoong de Seúl, Coreia [20].....	4
Figura 2.3 – Colapso do edifício Piper’s Row Carpark em Inglaterra [46] e ruimento de uma garagem subterrânea na localidade Suíça de Gretzenbach [19]	4
Figura 2.4 – Punçoamento em Lajes Fungiformes [37]	5
Figura 2.5 – Rotura por Punçoamento de uma Laje em Betão Armado [28]	5
Figura 2.6 – Reparação por reposição do betão [37].....	8
Figura 2.7 – Reparação por espessamento global da laje [37]	9
Figura 2.8 – Reforço externo por armadura de flexão-tracção [40]	10
Figura 2.9 – Reforço do Pilar por armadura de flexão-tracção [40]	11
Figura 2.10 – Reforço por adição de capitel de betão [40]	12
Figura 2.11 - Reforço por adição de capitel metálico [40].....	13
Figura 2.12 – Reforço recorrendo a pré-esforço Exterior [12].....	14
Figura 2.13 – Reforço recorrendo a parafusos transversais verticais e oblíquos	15
Figura 2.14 – Evolução da flecha por percentagem de carga [14]	17
Figura 2.15 – Características geométricas dos modelos PR1 e PR2 – Planta e corte [36].....	17
Figura 2.16 - Esquema de reforço dos modelos PR1 e PR2, respectivamente [36]	18
Figura 2.17 – Geometria e condições de fronteira das lajes octogonais reforçadas [30]	19
Figura 2.18 – Armadura Inferior e superior utilizada nos modelos [30].....	20
Figura 2.19 – Curvas Carga - Deslocamento dos 6 modelos [30].....	21
Figura 2.20 – Comparação da força no parafuso com o deslocamento vertical [30]	21
Figura 2.21 – Superfície de rotura das lajes 1 (não reforçada) e 6 (reforçada) [30].....	21
Figura 2.22 – Definição geométrica dos modelos ensaiados [9].....	23
Figura 2.23 – Armaduras dos modelos ensaiadas [9].....	23
Figura 2.24 – Pormenorização do reforço com FRP [9]	24
Figura 2.25 – Disposição em planta dos parafusos utilizados no reforço das lajes (com e sem abertura) [9].....	24
Figura 2.26 – Aspecto final das lajes SX-GF e SX-GF-SB respectivamente [9].....	25
Figura 2.27 – Aspecto final da laje SH-GF [9]	26

Figura 2.28 – Relação entre a carga aplicada e a deformação das lajes sem abertura [9]	26
Figura 2.29 – Definição geométrica e pormenorização do reforço das lajes [17]	27
Figura 2.30 – Pormenor dos parafusos usados por os autores no reforço das lajes fungiformes [17]27	
Figura 2.31 – Pormenor dos vários tipos de rotura obtidos e da fendilhação na face traccionada [17]29	
Figura 2.32 – Pormenor da geometria dos modelos e sua condição de fronteira [6].....	31
Figura 2.33 – Pormenor da geometria e posição dos elementos de reforço ao punçoamento [6]	32
Figura 2.34 – Pormenor da geometria dos parafusos usados (dimensões em mm) [6]	33
Figura 2.35 – Evolução dos deslocamentos verticais com a carga aplicada dos vários modelos [6]33	
Figura 2.36 – Inclinações da superfície de rotura com a horizontal [6]	34
Figura 2.37 – Aspecto geral de um dos ensaios de M. Luís [26]	35
Figura 2.38 – Ciclos de carga aplicado ao modelo C6 [26]	36
Figura 2.39 – Evolução das extensões das armaduras longitudinais superiores, nos modelos M6 e C6 (à esquerda) e M8 e C8 (à direita), Fase 2 [26]	37
Figura 2.40 – Flecha dos modelos R, C6 e M6, e R, C8 e M8 [26]	38
Figura 2.41 – Inclinações da superfície de rotura com a horizontal [26]	39
Figura 2.42 – Definição da secção crítica e traçado do reforço transversal: (a) pinos transversais e (b) estribos contínuos [33].....	41
Figura 2.43 – Curva de Rotação – Carregamento: (a) variação do sistema de reforço; (b) variando a dimensão do pilar; (c) variando a espessura da laje, h; (d) variando a percentagem de armadura de reforço, ρ_w [33]	42
Figura 2.44 – Rácio entre $V_{R,test}$ e $V_{R,theórico}$ de acordo com: (a) SAI 262; (b) ACI 318; (c) EC2; (d) CSCT [33]	44
Figura 2.45 – Modelos ensaiados: (a) geometria; (b) disposição do reforço; (c) esboço dos sistemas de reforço utilizados [35].....	45
Figura 2.46 – Curva de Rotação – Carregamento: (a) PV1 e PV15; (b) PV1 e PF2; (c) PV1 e PR1; (d) PV1 e PB1 [35].....	46
Figura 2.47 – Comparação entre cargas de rotura normalizadas [35]	47
Figura 2.48 – Perímetro de contorno de referência em redor da área carregada (REBAP) [39].....	49
Figura 2.49 – Perímetro do contorno de referência em redor da área carregada (MC90) [10]	50
Figura 2.50 – Perímetro de contorno de referência em redor da área carregada (ACI 318-08) [1]..	52
Figura 2.51 – Perímetro do contorno de referência considerado no Eurocódigo 2 [8]	53
Figura 3.1 – Aspecto geral dos modelos	55
Figura 3.2 – Geometria dos modelos ensaiados.	56
Figura 3.3 – Armadura longitudinal superior e inferior dos modelos.	57

Figura 3.4 – Aspecto geral da armadura do modelo da laje antes e depois da betonagem.	57
Figura 3.5 – Sistema de carregamento das lajes através de um macaco hidráulico.	58
Figura 3.6 – Prensa de compressão e pormenor de rotura de um cubo de betão.....	59
Figura 3.7 – Evolução da tensão com a extensão de um varão Ø6	60
Figura 3.8 – Evolução da tensão com a extensão de um varão Ø10	60
Figura 3.9 – Geometria dos parafusos utilizados nos ensaios.	61
Figura 3.10 – Ensaio à tracção de um parafuso de reforço e alguns parafusos utilizados no ensaio	61
Figura 3.11 – Evolução da força de um parafuso M6 com a extensão.....	62
Figura 3.12 – Evolução da força de um parafuso M8 com a extensão.....	62
Figura 3.13 – Prensa de compressão LabDec e pormenor de rotura de um prisma de betão polimérico	63
Figura 3.14 - Evolução da tensão de tracção com a extensão das resinas HILTI	63
Figura 3.15 – Diagrama tensão-deformação dos ensaios de compressão monotónica.....	64
Figura 3.16 – Unidade de controlo da pressão hidráulica usada nos ensaios.....	65
Figura 3.17 – Célula de carga HBM (Esq.) e célula de carga TML (Dta), ambas de 200 kN.....	65
Figura 3.18 – Localização dos deflectómetros e das células de carga verticais.....	66
Figura 3.19 – Vista geral dos deflectómetros (D1 a D5) apoiados no pórtico metálico.	66
Figura 3.20 – Localização dos extensómetros nos parafusos de reforço.	66
Figura 3.21 – Localização dos extensómetros colados à armadura longitudinal superior (Direcção “E-O”).	67
Figura 3.22 – Localização dos extensómetros nos parafusos de reforço.	67
Figura 3.23 – Unidades de aquisição de dados ”Data Logger HBM Spider 8” em série.	67
Figura 3.24 – Vista superior do modelo R após rotura por punçoamento.....	69
Figura 3.25 - Face inferior da laje antes e depois da colocação de tubos e reparação com argamassa.	70
Figura 3.26 – Mapa de localização dos parafusos de reforço.....	71
Figura 3.27 – Geometria das chapas de ancoragem dos parafusos (mm)	72
Figura 3.28 – Aspecto geral do reforço ao punçoamento com parafusos de um dos modelos, antes da aplicação da resina – Vista Superior e Inferior.....	72
Figura 3.29 – Aspecto geral do reforço ao punçoamento com parafusos de um dos modelos, durante a aplicação da resina – Vista Superior e Inferior.....	73
Figura 3.30 – Evolução das extensões na armadura longitudinal superior no modelo R (varões na direcção “N-S”).....	75
Figura 3.31 – Distribuição transversal das Extensões na armadura longitudinal Superior no Modelo R	75

Figura 3.32 – Evolução das extensões na armadura longitudinal superior nos modelos M6 e M6b – Fase 1.....	76
Figura 3.33 – Distribuição transversal das extensões na armadura longitudinal superior nos modelos M6 e M6b – Fase 1	77
Figura 3.34 – Evolução das extensões na armadura longitudinal superior nos modelos M6 e M6b – Fase 2.....	78
Figura 3.35 – Distribuição transversal das extensões na armadura longitudinal superior nos modelos M6 e M6b – Fase 2	79
Figura 3.36 – Evolução Global das extensões na armadura longitudinal superior nos modelos M6 e M6b	80
Figura 3.37 – Evolução das extensões na armadura longitudinal superior nos modelos M8 e M8b – Fase 1.....	81
Figura 3.38 – Distribuição transversal das extensões na armadura longitudinal superior nos modelos M8 e M8b – Fase 1	82
Figura 3.39 – Evolução das extensões na armadura longitudinal superior nos modelos M8 e M8b – Fase 2 (varões na direcção “N-S”)	83
Figura 3.40 – Distribuição transversal das extensões na armadura longitudinal superior nos modelos M8 e M8b–Fase 2	84
Figura 3.41 – Evolução Global das extensões na armadura longitudinal superior nos modelos M8 e M8b (varões na direcção “ N- S”)	85
Figura 3.42 – Evolução dos deslocamentos verticais com a carga vertical aplicada nos modelos R, M6 e M6b a uma distância de 750mm do centro, na direcção “E-O”	88
Figura 3.43 – Evolução dos deslocamentos verticais com a carga vertical aplicada nos modelos R, M6 e M6b a uma distância de 300mm do centro, na direcção “E-O”	89
Figura 3.44 – Deformada na direcção “E-O” para vários patamares de carga (modelos R, M6 e M6b).....	90
Figura 3.45 – Flecha dos modelos R, M6 e M6b na direcção “E-O”	91
Figura 3.46 – Evolução dos deslocamentos verticais com a carga vertical aplicada nos modelos R, M8 e M8b a uma distância de 750 mm do centro, na direcção “E-O”	92
Figura 3.47 – Evolução dos deslocamentos verticais com a carga vertical aplicada nos modelos M8 e M8b a uma distância de 300 mm do centro, na direcção “E-O”	92
Figura 3.48 - Deformada na direcção “N-S” para vários patamares de carga (modelos M8 e M8b).....	93
Figura 3.49 – Flecha dos modelos R, M8 e M8b, na direcção “E-O”	94
Figura 3.50 – Planta de parafusos instrumentados	96
Figura 3.51 – Face superior e inferior do modelo M6b após reforço	96
Figura 3.52 – Evolução da força nos parafusos 1, 2, 3, 4, 9,10,11 e 12 dos modelos M6 e M6b	97
Figura 3.53 – Evolução da força média nos parafusos Interiores e Exteriores dos modelos M6 e M6b	98

Figura 3.54 – Face superior e inferior do modelo M8b após reforço.....	99
Figura 3.55 – Evolução da força média nos parafusos Interiores e Exteriores dos modelos M8 e M8b.....	99
Figura 3.56 – Evolução da força no parafuso 1, 2, 3, 4, 5, 9, 10, 11 e 12 dos modelos M8 e M8b.....	100
Figura 3.57 – Vista superior e Inferior do modelos de Referência (R).	102
Figura 3.58 – Vista superior e inferior do modelo M6 após rotura.....	102
Figura 3.59 – Vista superior e inferior do modelo M8 após rotura.....	102
Figura 3.60 – Vista superior e inferior do modelo M6b após rotura.....	103
Figura 3.61 – Vista superior e inferior do modelo M8b após rotura.....	103
Figura 3.62 – Pormenor dos parafusos depois de rotura por punçoamento nos Modelos M6 a M8.....	103
Figura 3.63 – Resumo e comparação de resultados obtidos experimentalmente (EC2 e ACI 318 – 08)	110
Figura 3.64 – Corte do Modelo M8b em quatro quartos.....	111
Figura 3.65 – Visão global do modelo M8b após corte	112
Figura 3.66 – Inclinações da superfície de rotura com a horizontal.....	112
Figura 3.67 - Superfície de rotura dos modelos aderentes (2 metades superiores – M6b e 2 metades inferiores - M8b)	113
Figura 4.1 – Possível modo de rotura de lajes fungiformes quando sujeitas a reforço transversal.....	120
Figura 4.2 – Modo de rotura dos modelos M8 e M8b.....	120
Figura I 1 – Instrumentação dos modelos	124
Figura I 2 – Medição e registo de altura útil dos modelos	124
Figura I 3 – Betonagem e vibração dos modelos	125
Figura I 4 - Localização de cortes e das inclinações da superfície observadas (Modelo M6b)	126
Figura I 5 - Localização das vistas apresentadas (Modelo M6b)	126
Figura I 6 - Localização de cortes e das inclinações da superfície observadas (Modelo M8b)	128
Figura I 7 - Localização das vistas apresentadas (Modelo M8b)	128

LISTA DE TABELAS

Quadro 2.1 – Quadro síntese dos modelos PR1 e PR2 [36].....	18
Quadro 2.2 – Resumo dos ensaios realizados por Ph. Menétrey e E. E. Brühwiler [30]	20
Quadro 2.3 – Resultados dos ensaios realizados por Ph. Menétrey e E. Brühwiler [30]	22
Quadro 2.4 – Resumo dos ensaios realizados por El-Salakawy, Soudki e Polak [9].....	25
Quadro 2.5 – Resultados dos ensaios realizados por El-Salakawy, Soudki e Polak [9]	25
Quadro 2.6 – Resumo dos ensaios realizados por Harajli, Soudki e Kudsí [17].....	28
Quadro 2.7 – Resumo de ensaios experimentais [6]	32
Quadro 2.8 – Inclinações da superfície de rotura com a horizontal [6]	34
Quadro 2.9 – Resumo de ensaios experimentais [26]	37
Quadro 2.10 – Deslocamentos em 2 patamares de carga [26]	38
Quadro 2.11 – Inclinações da superfície de rotura com a horizontal [26]	39
Quadro 2.12 – Parâmetros dos modelos ensaiados [33].....	41
Quadro 2.13 – Propriedades mecânicas dos modelos ensaiados [35]	45
Quadro 3.1 – Altura útil média dos modelos.....	57
Quadro 3.2 – Propriedades mecânicas do betão.....	59
Quadro 3.3 – Caracterização do aço da armadura longitudinal.....	60
Quadro 3.4 – Caracterização do aço dos parafusos de reforço.....	61
Quadro 3.5 - Tensão última de tracção por flexão e respectiva extensão das resinas HILTI.....	63
Quadro 3.6 - Tensão de rotura à compressão e respectiva extensão das resinas HILTI	64
Quadro 3.7 – Carga aplicada na primeira fase (fendilhação).	69
Quadro 3.8 – Cargas de rotura experimental (kN)	73
Quadro 3.9 – Extensões médias na armadura longitudinal superior em 3 patamares de carga.....	86
Quadro 3.10 – Deslocamentos em 3 patamares de carga	95
Quadro 3.11 – Resumo das forças iniciais e finais de todos os parafusos nos modelos M6 e M6b..	98
Quadro 3.12 – Resumo das forças iniciais e finais dos parafusos nos modelos M8 e M8b.....	101
Quadro 3.13 – Valores experimentais normalizados.....	104
Quadro 3.14 – Valores experimentais normalizados.....	105

Quadro 3.15 – Carga de rotura experimental vs Carga de rotura de flexão de cálculo	105
Quadro 3.16 – Comparação entre as cargas de rotura experimentais e previstas segundo o EC2 (Resultados sem limitação da tensão no aço dos parafusos e sem limitação de k).....	107
Quadro 3.17 – Comparação entre as cargas de rotura experimentais e previstas segundo o EC2 (Resultados com limitação da tensão no aço dos parafusos e sem limitação de k).....	107
Quadro 3.18 – Comparação entre as cargas de rotura experimentais e previstas segundo o EC2 (Resultados com limitação da tensão no aço dos parafusos e com limitação de k).....	107
Quadro 3.19 – Resultados obtidos segundo o ACI 318 - 08	109
Quadro 3.20 – Resultados obtidos Experimentalmente, segundo o EC2 e o ACI 318 - 08	110
Quadro 3.21 – Inclinações da superfície de rotura com a horizontal	113

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 ASPECTOS GERAIS

Actualmente, os engenheiros civis enfrentam desafios cada vez mais exigentes e empreendedores. De forma a fazer face a um mercado cada vez mais inovador e concorrencial, vêm-se na necessidade de evoluir e ser criativos de forma a satisfazer as necessidades de ordem técnica, estética e económica, que diariamente se deparam.

A utilização de lajes fungiformes satisfaz um compromisso equilibrado entre as necessidades estruturais e a flexibilidade na utilização de espaços em edifícios. O recurso a estas lajes é usual, devido, essencialmente, à simplicidade, economia e rapidez de execução. A opção por lajes fungiformes permite uma maior versatilidade na divisão dos espaços, bem como uma maior facilidade na execução das instalações técnicas o que facilita eventuais futuras remodelações do edifício.

A solução de lajes fungiformes permite vencer maiores vãos e aligeirar as estruturas, minorando, desta forma, os efeitos das acções sísmicas, o que se pode revelar importante em zonas com elevada sismicidade.

Normalmente, o factor condicionante na escolha da espessura da laje a considerar é a resistência ao punçoamento.

1.2 OBJECTIVOS

A motivação para este trabalho surge na vontade de dar continuidade ao trabalho experimental levado a cabo e desenvolvido nos últimos anos, nomeadamente no caso Português, pelos investigadores Ramos [36, 37, 38], Duarte [6, 7] e Luís [26, 27]. Estes autores estudaram o comportamento ao punçoamento de lajes fungiformes reforçadas transversalmente com parafusos roscados submetidas a acções monotónicas e cíclicas, no caso de Luís.

Neste trabalho, pretende-se verificar-se as alterações de comportamento, modo de rotura e carga última experimental entre ensaios monotónicos com reforço do tipo aderente e não aderente e comparar estes resultados experimentais com alguns regulamentos.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é composta por quatro capítulos.

Neste capítulo é feita uma pequena apresentação do tema e definem-se os objectivos.

O segundo capítulo introduz o estado actual do problema. Faz uma descrição do mecanismo de rotura por punçoamento de lajes fungiformes, uma breve descrição e análise dos ensaios experimentais efectuados até à data relacionados com o tema e, por fim, são expostos os regulamentos mais relevantes que retratam o tema do punçoamento.

O terceiro capítulo apresenta os ensaios experimentais realizados no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Monte da Caparica. É apresentado todo o procedimento dos ensaios, os materiais e a sua caracterização e os dispositivos envolvidos. Tem como objectivo o estudo do efeito do carregamento monotónico em lajes fungiformes reforçadas ao punçoamento com parafusos transversais pré-esforçados aderentes e não aderentes. É realizada uma análise comparativa entre resultados obtidos experimentalmente e segundo alguns regulamentos em vigor.

O quarto e último capítulo apresenta as principais conclusões obtidas no decorrer deste trabalho e apresenta alguns desenvolvimentos futuros sobre o tema.

Será ainda apresentado um Anexo, com algumas fotografias do portefólio de fotos tiradas no decorrer do trabalho experimental apresentado.

Capítulo 2

ESTADO ACTUAL DO PROBLEMA

2.1 INTRODUÇÃO

A rotura por punçoamento, embora seja um fenómeno localizado, pode, em alguns casos dar início a uma rotura progressiva e ao colapso total da estrutura, uma vez que a perda de um ponto de apoio irá aumentar os esforços nos apoios vizinhos, podendo mesmo originar elevados prejuízos traduzidos em perdas humanas e materiais. Como exemplo, é de destacar o colapso total do centro comercial de Sampoong [13, 20] em Seúl (Coreia) em 1995 (ver Figura 2.1 e Figura 2.2), o colapso do edifício Piper's Row Carpark, de Wolverhampton (Inglaterra) em 1997 [46], e de uma garagem subterrânea em 2004 na localidade Suíça de Gretzenbach (observe-se Figura 2.3).

Existem já algumas técnicas de reforço de lajes fungiformes que têm vindo a ser estudadas e desenvolvidas desde o século passado, pelo que alguns destes trágicos acidentes poderiam ter sido evitados.

Neste capítulo, serão descritas sumariamente algumas técnicas de reforço ao punçoamento, fazer-se-á uma breve descrição dos ensaios experimentais já realizados no estudo do fenómeno de punçoamento em lajes reforçadas com pré-esforço transversal, nomeadamente, Ghali [14], Ramos [36, 37, 38], Menétrey [28, 29, 30], El-Salakawy Soudki e Polak [9], Harajili [17], Duarte [6, 7], Luís [26, 27], assim como dois ensaios levados a cabo por Muttoni [33, 35], que compara algumas técnicas de reforço usando armaduras transversais. Serão ainda mencionadas as recomendações presentes em alguns regulamentos que tratam o problema.



Figura 2.1 - Centro Comercial Sampoong de Seúl, Coreia [20]



Figura 2.2 – Abatimento total do Centro Comercial Sampoong de Seúl, Coreia [20]



Figura 2.3 – Colapso do edifício Piper's Row Carpark em Inglaterra [46] e ruímento de uma garagem subterrânea na localidade Suíça de Gretzenbach [19]

2.2 MECANISMOS DE ROTURA AO PUNÇOAMENTO

O punçoamento é uma rotura que ocorre numa zona de descontinuidade geométricas, denominada Zona D, onde se desenvolve um estado tridimensional de tensões muito complexo.

Em lajes fungiformes, a transferência de forças e momentos entre a laje e o pilar provoca elevadas tensões junto a este, originando fendilhação e podendo conduzir à rotura. A rotura por punçoamento em lajes está associada à formação de um tronco de pirâmide com tendência para se desligar do resto da laje. Esta superfície de rotura resulta da interacção de efeitos de corte e flexão na zona da laje próxima do pilar.

Trata-se de um mecanismo de colapso local, associado a uma rotura frágil, caracterizada pela tendência de o tronco de pirâmide se desligar do resto da laje, sem aviso prévio notório. Embora a rotura por punçoamento seja um fenómeno localizado, em alguns casos pode dar início a uma rotura progressiva e ao colapso total da estrutura, uma vez que a perda de um ponto de apoio irá aumentar os esforços nos apoios vizinhos, gerando novas roturas por punçoamento.

Numa laje fungiforme sujeita a esforços de punçoamento, irão surgir inicialmente fendas junto dos pilares. Com o aumento de carga, vão-se abrindo fendas paralelas às faces dos pilares, constituindo o que se denomina por fendilhação tangencial. Existirão ainda fendas

radiais que se prolongam a partir dos pilares, dividindo a laje em segmentos radiais (Figura 2.4).

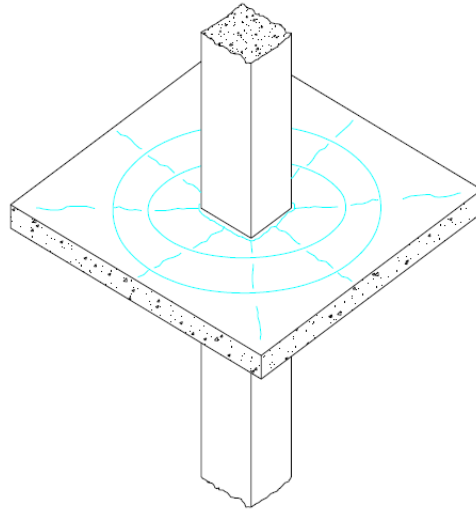


Figura 2.4 – Punçoamento em Lajes Fungiformes [37]

Na rotura, uma das fendas tangenciais prolonga-se segundo uma superfície inclinada, desde a face em tracção até à intersecção do pilar com a face da laje em compressão. A superfície de rotura terá a forma de tronco de pirâmide, tal como o exemplo da figura.

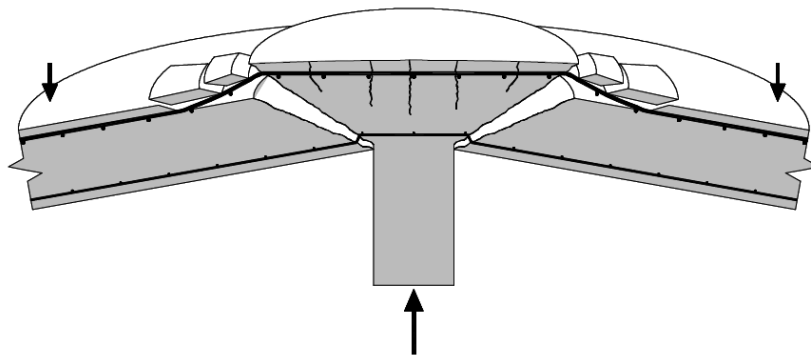


Figura 2.5 – Rotura por Punçoamento de uma Laje em Betão Armado [28]

Durante o processo que conduz à rotura por punçoamento de uma laje fungiforme, a fendilhação é o fenómeno não-linear com maior importância, e será utilizado para delimitar as diferentes fases de comportamento observáveis.

O mecanismo de rotura ao punçamento de uma laje fungiforme em betão armado ou armado pré-esforçado pode ser decomposto em quatro fases distintas:

Fase elástica-linear: nesta fase tanto o betão como o aço têm um comportamento elástico-linear não existindo fendilhação nem cedência das armaduras. Esta fase termina com o aparecimento da primeira fenda tangencial para uma carga vertical correspondente à carga crítica de fendilhação;

Fase de resposta à flexão: esta fase inicia-se com o aparecimento da primeira fenda de flexão, tangencial ao pilar, localizada na face superior da laje e contornando o perímetro do pilar. Com o incremento da carga vertical surgem fendas radiais junto ao perímetro do pilar que se propagam até ao limite da laje;

Fase de resistência ao corte: esta fase é caracterizada pelo aparecimento de fendas inclinadas ao longo da espessura da laje. No decorrer desta fase não surgem muitas fendas de flexão. As fendas existentes abrem e coalescem numa só fenda inclinada que leva à rotura por punçamento;

Fase de pós-rotura ao punçamento: a laje é dividida em duas partes limitadas pela fenda inclinada de punçamento. Estas duas partes da laje ficam ligadas entre si pela armadura existente que atravessa a referida fenda.

Estas quatro fases em que se divide o mecanismo de rotura ao punçamento foram observadas na maioria dos ensaios ao punçamento documentados, embora a transição entre a fase de resposta à flexão e a fase de resistência ao corte não seja clara.

De forma a evitar este tipo de rotura, é recorrente o uso de capitéis na ligação aos pilares de apoio, assim como o uso de armaduras específicas de punçamento. A utilização destes modelos é eficaz, desde que bem dimensionada.

Devido à generalizada utilização de lajes fungiformes, alguns dos actuais sistemas estruturais em laje fungiforme não apresentam uma adequada segurança contra a rotura por punçamento. Isso deve-se, essencialmente a erros de projecto, erros de execução em obra, causas acidentais, betão de resistência inferior à necessária, pilares de diâmetro inferior ao recomendado, espessura da laje insuficiente, deterioração do betão ou corrosão das armaduras, alteração de função estrutural, sempre que dessa alteração resulte modificação do tipo ou aumento das cargas, assim como casos de falta de manutenção.

2.3 TÉCNICAS DE REPARAÇÃO E REFORÇO DE LAJES FUNGIFORMES

O reforço de estruturas é uma forma eficiente de utilizar materiais de alta resistência e, desta forma, tirar o melhor partido das suas propriedades mecânicas.

Actualmente existem vários tipos de reforço de lajes fungiformes que têm como princípio o facto de a sua resistência ao punçoamento depender dos seguintes parâmetros:

- Quantidade de armadura de flexão e de punçoamento na zona de ligação aos pilares (zona de maior concentração de tensões por corte e flexão);
- Secção do pilar;
- Espessura da laje;
- Resistência do betão;
- Dimensão do vão ou área carregada;
- Momentos transferidos entre a laje e o pilar;
- Geometria da laje (aberturas na laje, etc.);
- Localização do pilar (pilar de canto, pilar de bordo, etc.).

As medidas de reforço, “a posteriori”, afectam os três primeiros parâmetros, visto que os últimos são dados impostos ao já existente no edifício a reforçar.

As causas que obrigam à necessidade de intervenção são variadas, podendo destacar-se:

- Erros de projecto;
- Defeitos na construção/execução em obra ou em estaleiro;
- Danos causados por acções externas (deterioração da estrutura por ausência de conservação, sismos, acidentes, assentamentos diferenciais);
- Alteração do tipo de utilização da estrutura;
- Eliminação de elementos estruturais.

Estas ocorrências levam a situações onde nem sempre é fácil definir a fronteira entre uma acção de reforço de uma estrutura e uma acção de reparação.

Diversos tipos de reparação e/ou reforço têm sido usados para aumentar, ou repor, a resistência ao punçoamento de lajes fungiformes. Salientam-se, de entre estas, o reforço utilizando uma ou mais das seguintes técnicas: betão armado, betão projectado, perfis metálicos, pré-esforço, chapas de aço coladas ao betão com resina epoxídica, adicionando ou não buchas metálicas e a utilização de materiais compósitos, tendo por base as fibras de carbono, de vidro ou aramídicas.

O grau de reforço a efectuar deverá estar associado ao nível de segurança pretendido. Especialmente em regiões sísmicas, é necessário ter em conta o efeito global da intervenção, devendo, para tal, proceder-se a uma reanálise da estrutura, dado que a escolha do tipo de reforço poderá influenciar e afectar a sua ductilidade. O reforço da estrutura pode ir desde a substituição de materiais de pior qualidade por outros mais

resistentes, passando pelo aumento das dimensões das secções, pela substituição total ou parcial de elementos ou pela introdução de novos elementos estruturais.

Apresentam-se de seguida algumas dessas técnicas e a análise de alguns dos conceitos relacionados com a sua aplicação.

2.3.1 Reparação por Reposição do Betão

Este método de reparação consiste na reposição do betão danificado [25, 37, 38, 40].

Aplica-se em situações em que seja necessário repor a resistência inicial, devido a uma carga accidental (sismo, assentamento de apoio, etc.), rotura por punçamento local. Com este método, é possível obter resistências ao punçamento muito próximas das resistências iniciais, sem reforços adicionais.

A camada de betão ou argamassa aplicada irá trabalhar através da aderência entre ele próprio e o betão existente. A sua eficácia dependerá da escolha acertada do material de reparação a utilizar, da preparação da superfície a reparar, do modo de aplicação do betão de reparação e da sua cura.

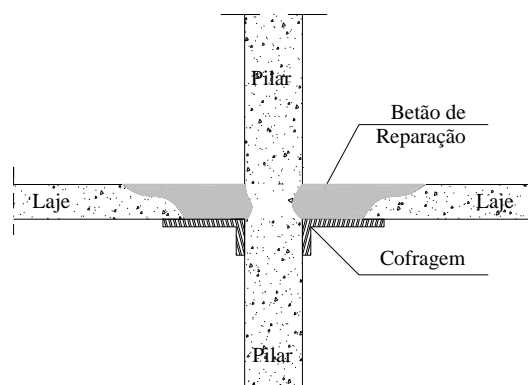


Figura 2.6 – Reparação por reposição do betão [37]

2.3.2 Reforço por Espessamento da Laje

O reforço por espessamento da laje [25, 37, 38, 40], consiste em aumentar a secção dos elementos de betão armado por adição de betão novo, devidamente solidarizado ao existente, e de novas armaduras. O uso de armaduras transversais bem ancoradas (conectores) possibilita o aumento do mecanismo de atrito entre as duas camadas. Com este método, obtém-se um aumento da altura útil, obtém-se uma maior resistência à flexão e ao punçamento.

A necessidade do aumento de resistência das zonas de betão comprimido justifica-se, por exemplo, quando as dimensões da secção de betão são insuficientes, ou quando a qualidade

do betão é inferior ao especificado no projecto. Contudo, esta solução aumenta substancialmente o peso próprio da laje e, portanto, a carga de punção. O reforço com adição de betão requer que a estrutura seja descarregada e que o recobrimento do betão seja retirado. O betão suplementar aumenta, sobretudo, a capacidade de flexão e punção.

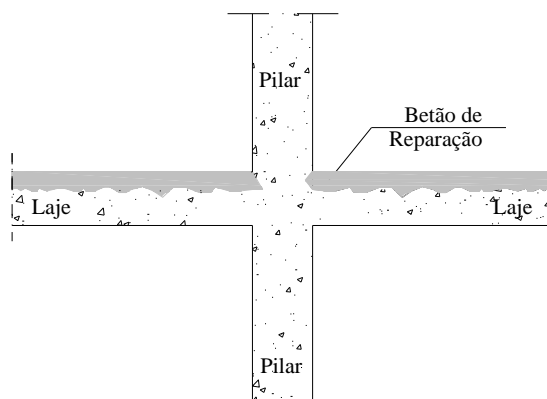


Figura 2.7 – Reparação por espessamento global da laje [37]

Se se usarem como reforço de corte, haverá que ter especial atenção a certas medidas especiais, para que as juntas de betão possam transmitir todas as forças presentes a toda a zona de possível falha por punção.

Tal como o reforço anterior, o sucesso deste método é tanto maior quanto mais monolítico for a ligação entre a camada de betão adicionada e a de betão existente, pelo que dependerá da escolha acertada do material de reparação a utilizar, da preparação da superfície do betão existente, das armaduras, do modo de aplicação do betão de reparação e da sua cura.

Uma cura eficiente é essencial para uma reparação eficiente.

2.3.3 Reforço através de Chapas Coladas (armadura externa)

O reforço com chapas coladas consiste na adição de armaduras exteriores à estrutura existente, constituídas por chapas ou perfis de aço, ligados à superfície da estrutura por colagem com resina epoxídica e buchas. Este método consiste em aumentar a armadura da laje, obtendo-se uma maior resistência à flexão e ao punção (por aumento da percentagem mecânica de armadura) [3, 4, 5, 25, 37, 38, 40].

Trata-se de uma técnica bastante eficiente na redução da fissuração e da deformação do elemento de betão armado. A sua principal vantagem é o reduzido acréscimo que provoca nas dimensões da secção de betão armado. Contudo, a resistência do betão armado nas superfícies de intervenção poderá condicionar a sua utilização.

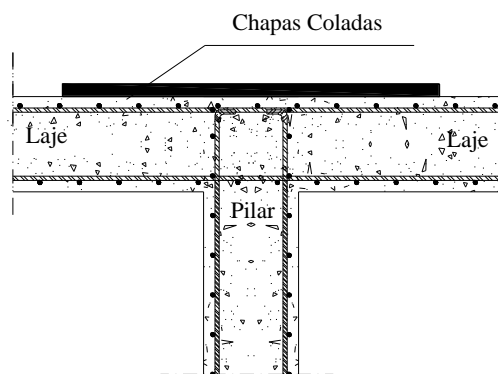


Figura 2.8 – Reforço externo por armadura de flexão-tracção [40]

É necessário ter em conta as diferenças de rigidez entre os elementos (aço e betão) a aquando do seu dimensionamento.

Tal como o reforço anterior, o sucesso deste método é tanto maior quanto mais monolítico for a ligação entre as chapas e a camada de betão existente, pelo que dependerá da escolha acertada do material de reparação a utilizar, da preparação da superfície do betão existente, das armaduras, do modo de aplicação das resinas, das chapas e das buchas.

Se a parte superior da laje for acessível, este método torna-se mais limpo e fácil de colocar.

2.3.4 Reforço através de Lâminas de Polímero reforçadas com Fibras (armadura externa)

Este método é, em tudo, semelhante ao reforço com chapas coladas, usando-se agora como elemento base, não as chapas, mas as lâminas de plástico reforçadas com fibras.

O reforço com lâminas coladas consiste na adição de lâminas de polímero reforçadas com fibras à estrutura existente, ligadas à superfície da estrutura por colagem com resina epoxídica [37, 38, 40, 43]. Este método consiste em aumentar a armadura da laje obtendo-se uma maior resistência à flexão. É necessário ter em conta as diferenças de rigidez entre os elementos (fibras e betão) a aquando do seu dimensionamento.

Tal como o reforço anterior, o sucesso deste método é tanto maior quanto mais monolítico for o trabalho entre as fibras e a camada de betão existente, pelo que dependerá da escolha acertada do material de reparação a utilizar, da preparação da superfície do betão existente, das armaduras, do modo de aplicação das resinas, das fibras, e sua reparação.

Se a parte superior da laje for acessível, este método torna-se mais limpo e fácil de colocar.

A superfície de betão deverá ser preparada de modo a retirar a leitada superficial na zona em contacto com a resina epoxídica e tornar a superfície rugosa e “homogénea”.

Os processos mais utilizados na preparação da superfície de betão são: a preparação com jacto de areia; a preparação utilizando o martelo de agulhas; a picagem da superfície com bujarda, utilizando nos bordos martelo e escopro; a fresagem utilizando equipamento específico ou rebarbadora com um disco apropriado para este fim. Após a preparação da superfície do betão, deve proceder-se à aplicação do FRP, consoante a técnica especificada por cada fabricante [2, 3, 4, 5, 25].

Em qualquer dos sistemas, a aplicação é, essencialmente, condicionada pelo “pot live”¹ específico de cada uma das resinas, que começa a contar a partir do momento em que são misturados, nas proporções especificadas, o endurecedor e a resina epoxídica.

A largura dos rolos de fibra depende do fabricante.

2.3.5 Reforço pelo Aumento da Secção do Pilar

O reforço pelo aumento da secção do pilar pode ser realizado utilizando todas as técnicas descritas anteriormente [37, 40].

Reforço por encamisamento, técnica indicada quando seja necessário aumentar as dimensões das secções de betão, em zonas sujeitas a elevadas forças de compressão, para resistir aos esforços actuantes, ou para aumentar a rigidez dos elementos estruturais de forma a controlar as deformações para valores inferiores aos limites regulamentares.

Este aumento da secção do pilar, é particularmente importante em pilares com deficiência nas dimensões da secção transversal ou na qualidade do betão, e, é especialmente indicado para o aumento da ductilidade dos pilares às acções sísmicas e aumento da resistência ao punçoamento, uma vez que, com o aumento da secção do pilar se aumenta o perímetro (u).

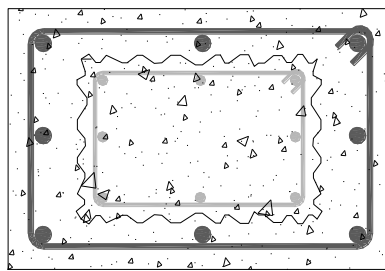


Figura 2.9 – Reforço do Pilar por armadura de flexão-tracção [40]

¹ Entende-se por “pot-life” o período de tempo no qual a mistura deve ser aplicada a uma determinada temperatura. Em geral, e para a construção, esse período varia entre os 45 e os 120 minutos.

2.3.6 Reforço por Adição de Capitel de Betão

A colocação de um capitel de betão armado por baixo da laje fungiforme e junto ao pilar permite aumentar a altura útil na zona de punçamento, promovendo o aumento da resistência da laje [37, 38, 40]. Os capitéis a acrescentar podem ter a forma prismática, em tronco de pirâmide invertida de secção quadrangular, Figura 2.10, ou ainda, tronco-cónica.

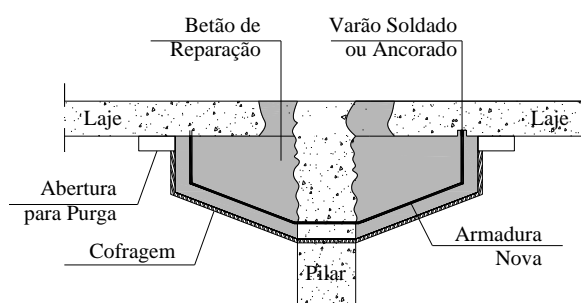


Figura 2.10 – Reforço por adição de capitel de betão [40]

A execução deste tipo de reforço realiza-se em várias fases: escarificação das faces do pilar junto à superfície inferior da laje, na zona a colocar o capitel, até se atingir as armaduras longitudinais; limpeza e preparação da superfície inferior da laje (incluindo os cuidados descritos anteriormente na ligação de dois betões de idades diferentes); colocação das armaduras que vão formar o capitel; se necessário, aplicação de uma camada de ligação de resina epoxídica à superfície do betão, para promoção de uma melhor aderência entre os betões de diferentes idades; colocação da cofragem; betonagem do capitel e, finalmente, a cura do betão.

Deve ser feita uma escolha criteriosa do tipo de betão de reforço a utilizar. A forma da cofragem deverá assegurar que o betão chegue a todo o lado e que não fique nenhuma bolsa de ar aprisionada. O betão deverá ter consistência plástica ou fluido-plástica, de maneira a que possa ser satisfatoriamente colocado e compactado. Deverá compactar-se o betão com o auxílio de um vibrador. Caso não seja possível a utilização de um vibrador convencional, dever-se-á recorrer a um vibrador externo, aplicado na cofragem. A cura poderá ser conseguida através de molhagens ou pela aplicação de membranas adequadas durante o período já anteriormente referido.

2.3.7 Reforço por Adição de Capitel Metálico

Outra solução possível para o reforço ao punçamento de lajes fungiformes pode ser a aplicação de um capitel formado por perfis metálicos. Este capitel será colocado inferiormente à laje e fixado ao pilar [25, 37, 38, 40].

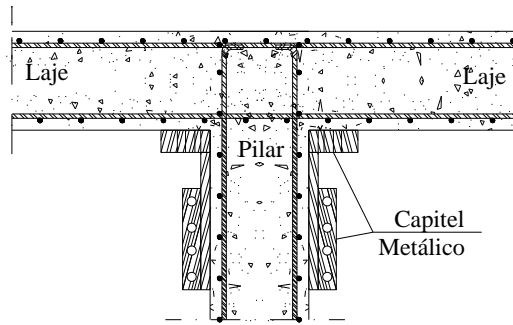


Figura 2.11 - Reforço por adição de capitel metálico [40]

A fixação poderá ser feita através de colagem com resina epoxídica, e, eventualmente, buchas metálicas de expansão mecânica. Para aumentar a ductilidade da ligação, e diminuir o risco de rotura brusca, nomeadamente em caso de incêndio, é aconselhável usar uma fixação mista de resina epoxídica e buchas metálicas. Antes da colocação do capitel metálico, deve ser dado cuidado especial à preparação da superfície do betão e do aço.

A preparação da superfície de betão consiste em retirar a leitada superficial deste, na zona que vai estar em contacto com a resina epoxídica, e tornar a superfície rugosa. Os processos mais utilizados na preparação da superfície do betão são: o jacto de areia; a picagem da superfície com a bujarda, ou ainda a utilização de um martelo de agulhas.

A superfície dos perfis de aço, que irá estar em contacto com a resina epoxídica, deverá ser devidamente decapada. Com esta decapagem pretende retirar-se a gordura e a oxidação normalmente existentes no aço. Os métodos mais utilizados na decapagem são: decapagem por grenalhagem e decapagem por jacto de areia.

Após a decapagem, a superfície deverá ser protegida do meio ambiente, de modo a evitar a oxidação, até à sua aplicação. De forma a não existirem zonas gordurosas, deve evitar-se o contacto das mãos com a superfície decapada. Uma forma possível e eficiente de proteger a superfície decapada dos perfis é pulverizar uma película de verniz sobre a mesma, que será retirada apenas na altura da montagem do perfil.

É conveniente proceder ao preenchimento do espaço existente entre a face inferior da laje e o capitel metálico, de modo a que este seja solicitado logo desde o início do carregamento. Pode preencher-se este espaço com uma argamassa ligeiramente expansiva e de alta resistência à compressão, em alternativa à resina epoxídica.

2.3.8 Reforço Recorrendo a Pré-esforço Exterior

Num trabalho de investigação, em curso do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, e realizado por Faria [12], estudou-se uma técnica de reforço de lajes através da introdução de pós-tensão usando ancoragens por aderência na zona da ligação pilar-laje.

O sistema de reforço consiste na furação da laje de betão (Figura 2.12 (a)), introdução dos cordões de pré-esforço nos furos (Figura 2.12 (b)), tensionamento dos mesmos com o auxílio de ancoragens provisórias (Figura 2.12 (c)), injeção dos furos com um agente de aderência (Figura 2.12 (d)) e por fim a libertação das ancoragens provisórias e transferência das forças de pré-esforço para o betão (Figura 2.12 (e)) por aderência. Na Figura 2.12 (f) está representada uma vista superior do aspecto do reforço na sua vertente unidireccional. Importa referir que este reforço pode também ser realizado bidireccionalmente e usando vários cordões em cada um dos lados do pilar, por forma a aumentar a sua eficiência.

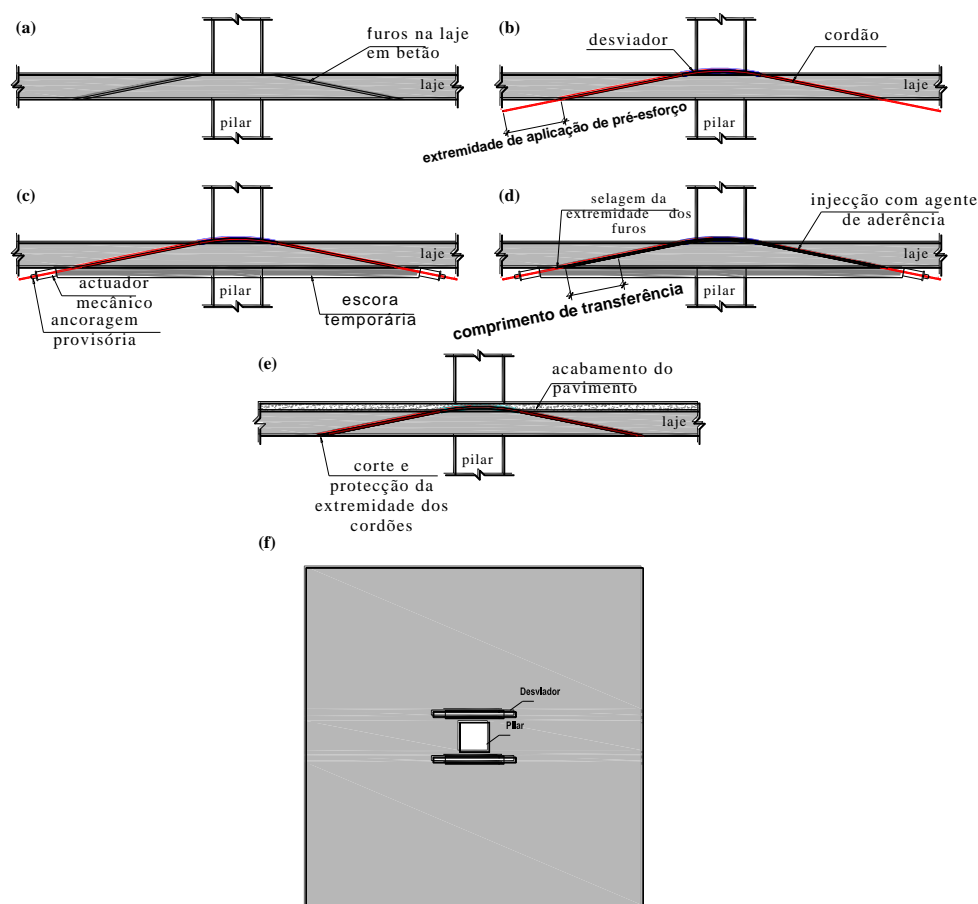


Figura 2.12 – Reforço recorrendo a pré-esforço Exterior [12]

As principais vantagens deste sistema de reforço são a sua economia uma vez que dispensa o uso de ancoragens definitivas, a sua facilidade de instalação, a não alteração da estética e não utilização do espaço útil disponível. Além disso, o facto das tensões na zona de ancoragem serem transferidas gradualmente ao longo do comprimento de transferência, leva a que não exista concentração de tensões junto às ancoragens, tal como acontece no sistema tradicional de reforço com pré-esforço.

Este sistema actua simultaneamente em termos de reforço da resistência ao punçamento e flexão, além de que reduz deformações e fendilhação existente.

2.3.9 Reforço recorrendo a Armadura Transversal pós-instalada

De uma maneira geral, são usadas armaduras verticais ou oblíquas, que poderão ser ou não injectadas com resina epoxídica, no espaço entre a armadura e a laje.

Poderemos destacar alguns tipos de armadura usados correntemente, tais como pinos, buchas químicas e parafusos roscados.

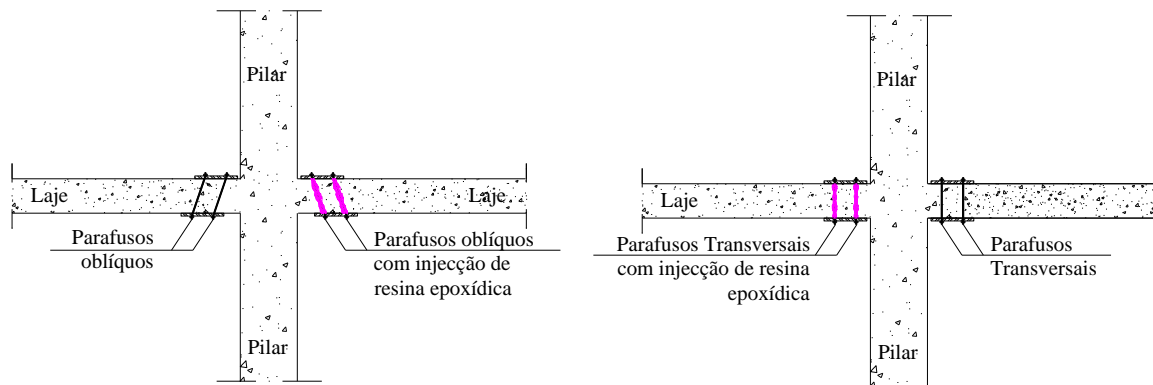


Figura 2.13 – Reforço recorrendo a parafusos transversais verticais e oblíquos

Após alguns ensaios, tem-se vindo a verificar que a ancoragem das armaduras influencia a capacidade resistente por fenómenos de punçoamento, assim como a utilização de resina epoxídica na sua ligação à laje confere uma superior capacidade de deformação, graças ao maior monolitismo da ligação, associado a uma considerável carga de rotura [6, 15, 17, 26, 33, 35, 36].

Desta forma, aconselha-se a utilização de parafusos roscados e ancorados em chapas nas faces superior e inferior, e se possível injectados com resina epoxídica.

A técnica de reforço ao punçoamento, utilizando parafusos verticais como armadura específica, pode ser utilizada em situações em que a laje apresente défice de resistência ao punçoamento ou de forma a aumentar a sua ductilidade.

Pré-esforçando a laje verticalmente perto das faces do pilar, consegue-se retardar ou mesmo evitar a rotação e o alargamento da fenda inclinada necessária para a formação da superfície de rotura, conduzindo deste modo a um substancial incremento na resistência das lajes ao punçoamento. Além do referido, observa-se ainda, que lajes com pré-esforço transversal podem suportar maiores deformações antes de ocorrer a rotura, aumentando a sua ductilidade.

A utilização desta técnica permite obter um aumento de resistência, acompanhado por um acréscimo de ductilidade na ligação pilar-laje. Esta plasticidade adicional é importante em estruturas sujeitas a sismos, destacando-se a fácil intervenção, o baixo custo, a rapidez de execução e ainda o baixo impacto estético. Deste modo torna-se imperativo uma análise experimental para, em complemento com os conhecimentos teóricos, possibilitar um auxílio no cálculo da resistência ao punçoamento de lajes reforçadas com parafusos.

A questão da análise experimental como base de cálculo da resistência ao punçoamento tem ainda maior expressão visto vários autores terem tratado este problema de forma analítica, no entanto, sem larga aceitação. Para além disto a grande maioria dos regulamentos, ou recomendações internacionais, utilizam expressões empíricas para cálculo da resistência ao punçoamento em lajes fungiformes, baseadas essencialmente em resultados de ensaios experimentais.

Os resultados de ensaios experimentais ao punçoamento de lajes fungiformes são em todo o mundo já relativamente abundantes. No entanto o mesmo já não se passa com o caso das lajes fungiformes reforçadas com parafusos, em que o número de ensaios publicados é relativamente baixo.

2.4 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Apresentam-se em seguida alguns ensaios experimentais levados a cabo para o estudo do problema do punçoamento em lajes fungiformes reforçadas com parafusos transversais. A apresentação é feita por ordem cronológica. Serão apresentados os ensaios experimentais levados a cabo por Ghali [14], Ramos [36, 37, 38], Menétrey e Brühwiler [30], El-Salakawy, Soudki e Polak [9], Harajli, Soudki e Kudsi [17], Duarte [6, 7], Luís [26, 27] e serão ainda apresentados dois ensaios comparativos entre sistemas de reforço, que incluem a técnica de reforço ao punçoamento por armaduras transversais pós-instaladas, sendo uma aderente, por intermédio de resinas epoxídicas. Estes ensaios foram realizados por Muttoni [33, 35], coincidindo com o mesmo período da realização deste trabalho, sendo interessante pelo facto de convergirem na técnica abordada neste trabalho.

2.4.1 Ensaios de Ghali

Os ensaios realizados por Ghali [14] permitem concluir que, introduzindo parafusos verticais pré-esforçados junto às faces do pilar, é possível retardar ou mesmo evitar a rotação e o alargamento da fenda inclinada, fenda essa necessária para a formação da superfície de rotura, conduzindo deste modo a um substancial incremento na resistência das lajes ao punçoamento. Esta conclusão é fundamentada a partir dos seus ensaios, nos quais foram obtidas cargas últimas de 1.67 a 1.92 vezes superiores a valores de carga última em lajes similares sem reforço transversal. Este incremento de carga permite maiores deformações antes de ocorrer a rotura da laje, aumentando desta forma a ductilidade na ligação pilar-laje.

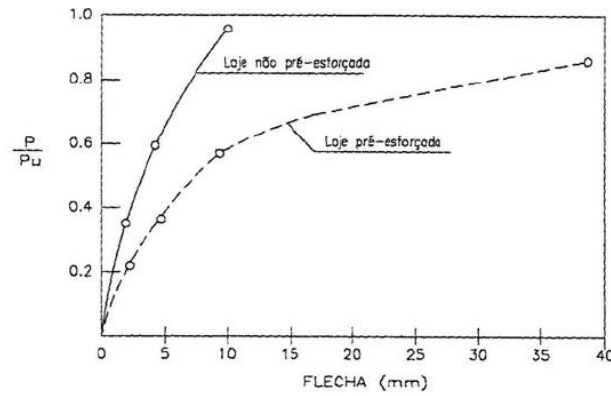


Figura 2.14 – Evolução da flecha por percentagem de carga [14]

2.4.2 Ensaios de Ramos

Ramos [36, 37, 38] ensaiou dois modelos de lajes fungiformes maciças quadradas com 2000 mm de lado e 100 mm de espessura (observe-se Figura 2.15), 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, como ilustra a Figura 2.16.

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.

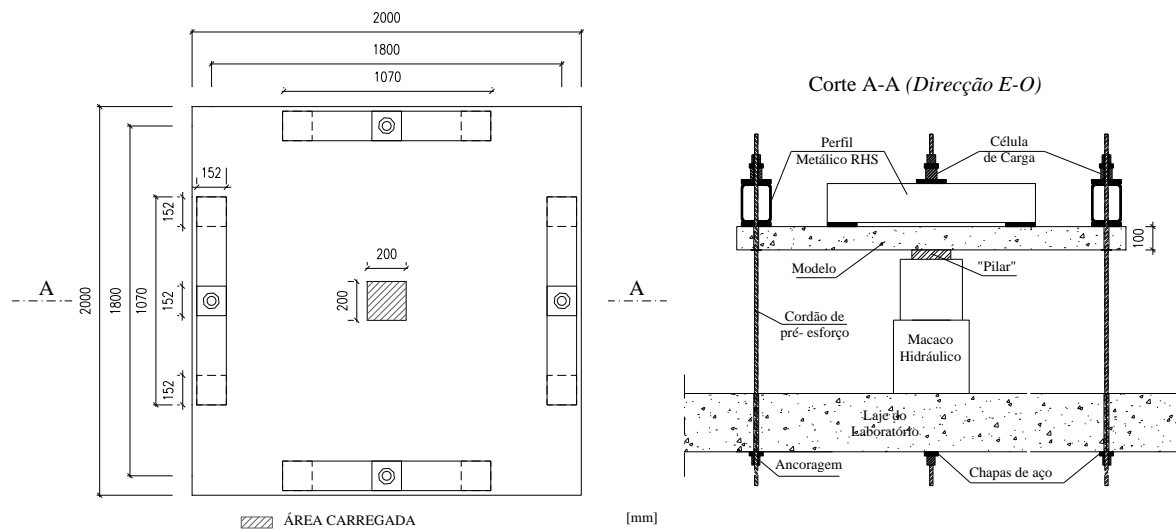


Figura 2.15 – Características geométricas dos modelos PR1 e PR2 – Planta e corte [36]

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 2.16) 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 de 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.

No modelo PR2, os parafusos de canto foram aproximados do pilar, efectuando-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.

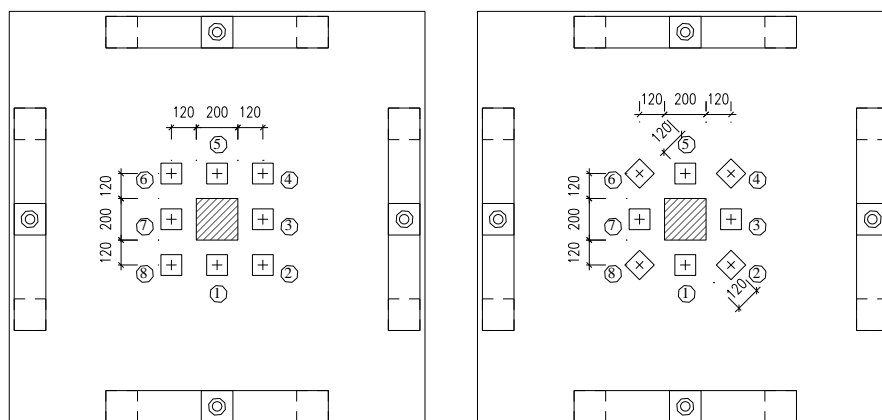


Figura 2.16 - Esquema de reforço dos modelos PR1 e PR2, respectivamente [36]

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°. 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°.

Em seguida, apresenta-se no Quadro 2.1, uma síntese com os valores obtidos para a resistência do betão à compressão, bem como da tensão de rotura à tracção da armadura longitudinal (varão Ø10), da força de rotura à tracção do aço utilizado nos parafusos de reforço e os valores obtidos, experimentalmente, para a carga de rotura dos modelos.

Quadro 2.1 – Quadro síntese dos modelos PR1 e PR2 [36]

Modelo	Betão	Varões	Parafusos	V_{exp} (kN)
	f_{ccm} (MPa)	f_{su} (MPa)	F_u (kN)	
PR1	39.2	575	36.1	240
PR2	38.6			250

Nota: f_{ccm} – tensão média de rotura à compressão do betão em provetes cúbicos; f_{su} – tensão de rotura do aço; F_u – força de rotura à tracção do aço dos parafusos; V_{exp} – carga de rotura experimental

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, o valor de pré-esforço 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 $P_{Rm,flexão} = 266.5 \text{ kN}$) 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; contudo, a variação de pré-esforço não é significativa em termos de carga de rotura experimental. A variação de carga de rotura foi de apenas 4 %, com o incremento de força aplicada aos parafusos.

2.4.3 Ensaios de Menétrey e Brühwiler

Menétrey e Brühwiler [30] ensaiaram seis modelos (Quadro 2.2), sendo utilizados modelos octogonais com diâmetro de 1200 mm e altura de 120 mm, instalados 8 parafusos diametralmente afastados 140 mm do centro da laje (Figura 2.17 e Figura 2.18). O sistema de ensaio utilizado consistiu na aplicação de uma força vertical no centro da laje bi-apoiada lateralmente em perfis RHS 80 x 45 x 5 mm³, por intermédio de um macaco hidráulico.

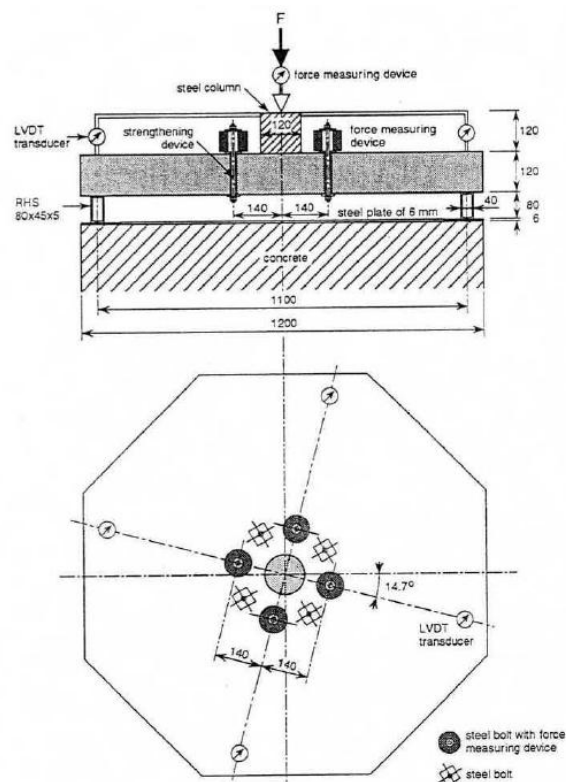


Figura 2.17 – Geometria e condições de fronteira das lajes octogonais reforçadas [30]

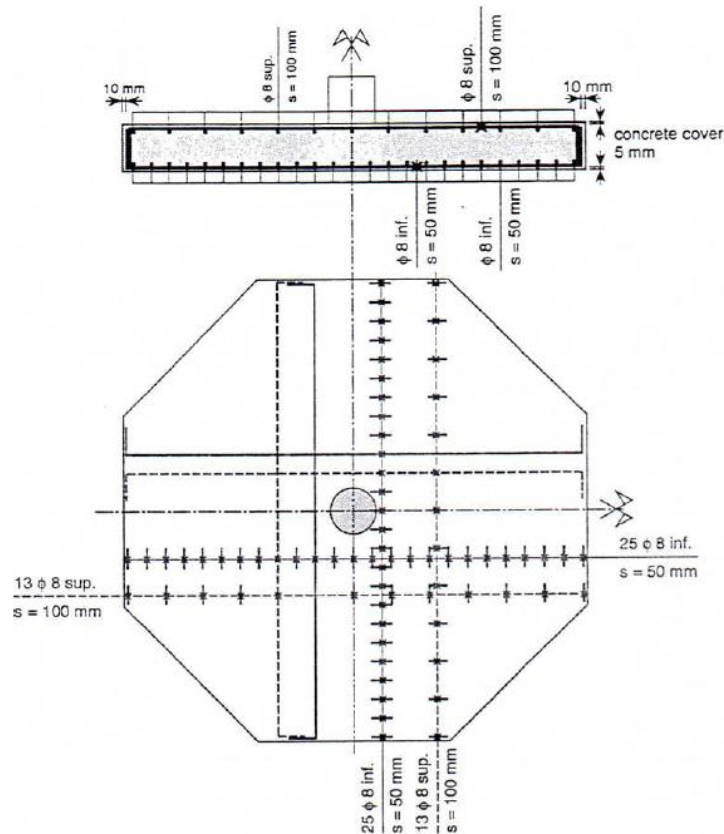


Figura 2.18 – Armadura Inferior e superior utilizada nos modelos [30]

Quadro 2.2 – Resumo dos ensaios realizados por Ph. Menétrey e E. E. Brühwiler [30]

Laje	Parafusos	Força Instalada nos Parafusos	Tipo de Injecção
1	-	-	-
2	8 Ø 10 mm	Ajustada	Não injectados
3	8 Ø 10 mm	$P_0=35.3$ kN	Não injectados
4	8 Ø 10 mm	Ajustada	Resina epoxídica
5	8 Ø 10 mm	$P_0=35.3$ kN	Resina epoxídica
6	8 Ø 10 mm	$P_0=35.3$ kN	Resina epoxídica

Os autores constataram que o cone de punçamento da laje 1 (não reforçada) tem um diâmetro superior às lajes reforçadas. No modelo de laje 6, o ângulo da superfície de rotura com a horizontal é de $\approx 70^\circ$, bastante superior ao modelo da laje 1 (entre 30° a 35°). Verificou-se um incremento de 37 % na resistência ao punçamento da laje 1 para a laje 6.

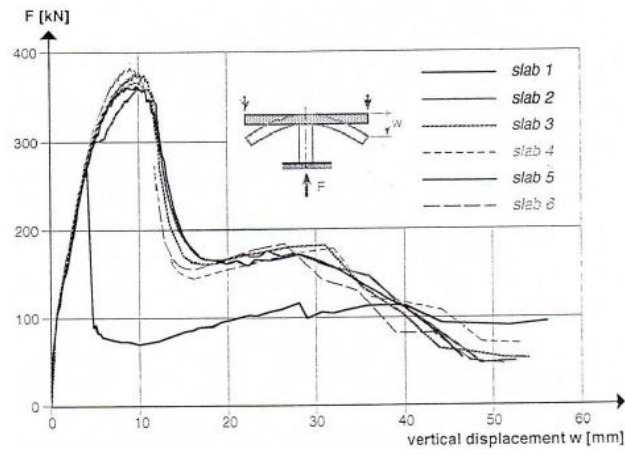


Figura 2.19 – Curvas Carga - Deslocamento dos 6 modelos [30]

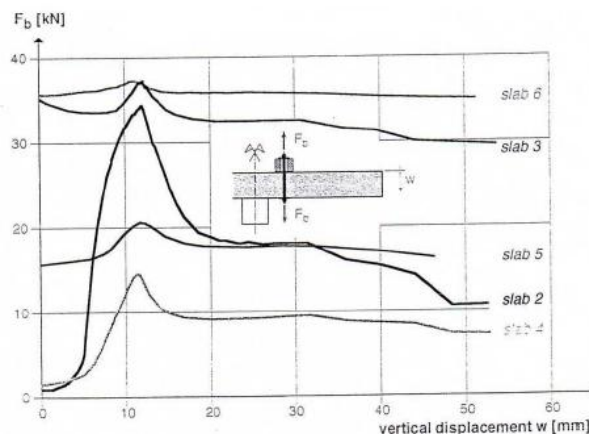


Figura 2.20 – Comparação da força no parafuso com o deslocamento vertical [30]

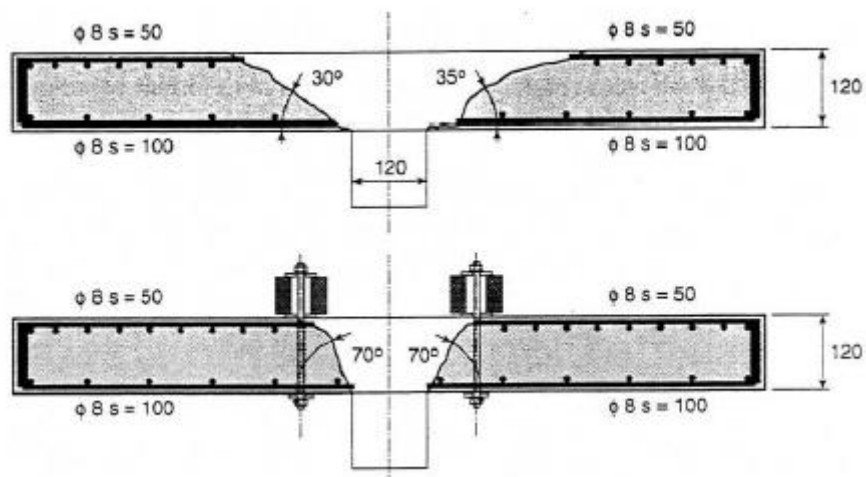


Figura 2.21 – Superfície de rotura das lajes 1 (não reforçada) e 6 (reforçada) [30]

Quando comparadas as lajes 2 e 3 (variação do pré-esforço aplicado aos parafusos) verifica-se um acréscimo de 4 % na resistência ao punçoamento entre a laje 2 e a laje 3. Situação já verificada nos ensaios de Ramos [36]. Volta-se a verificar a pouca influência que a variação do pré-esforço nos parafusos tem no acréscimo de resistência ao punçoamento.

Observa-se 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 um escorregamento repentino destes, melhorando a resistência da laje.

Quadro 2.3 – Resultados dos ensaios realizados por Ph. Menétrey e E. Brühwiler [30]

Laje	V_{exp} (kN)	$w(V_{exp})$ (mm)	$F_b(max)$ (kN)	$w(F_b(max))$ (mm)
1	280.1	4.20	-	-
2	359.4	9.89	34.39	11.95
3	375.2	9.56	37.25	12.15
4	367.6	10.06	14.42	11.59
5	361.1	9.70	20.64	11.78
6	383.0	9.06	37.04	11.09

Nota: V_{exp} – carga de rotura experimental; $w(V_{exp})$ – deslocamento vertical correspondente à carga de rotura; $F_b(max)$ – força máxima nos parafusos; $w(F_b(max))$ – deformação máxima da laje correspondente à força máxima nos parafusos.

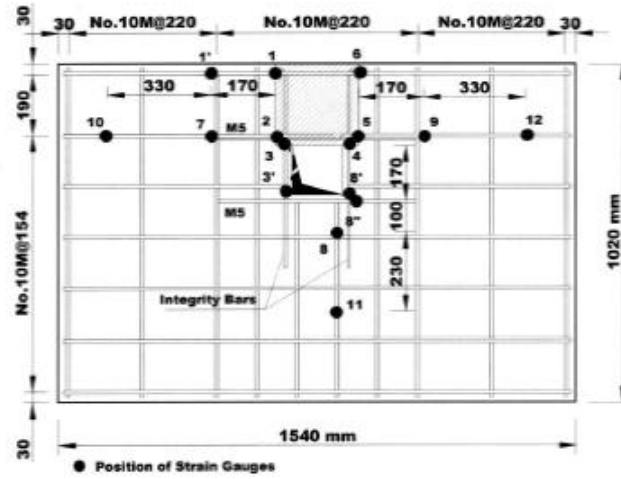
2.4.4 Ensaios de El-Salakawy, Soudki e Polak

El-Salakawy, Soudki e Polak [9] estudaram a utilização de GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymers) e CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymers) em conjunto com parafusos para reforçar lajes fungiformes ao punçoamento. Foram ensaiados sete modelos, simulando a zona da laje junto a um pilar de bordo.

Os modelos tinham dimensões em planta de 1540 x 1020 mm² e 120 mm de espessura. Foram utilizadas várias técnicas de reforço incluindo 2 lajes reforçadas com parafusos, cujos resultados se encontram no Quadro 2.4.

No reforço, para além dos parafusos, foram também utilizados laminados de fibras de vidro e de carbono.

Os autores estudaram ainda as alterações de comportamento provocadas por uma abertura junto ao pilar em alguns dos modelos ensaiados.



(a) Tension Flexural Reinforcement

Figura 2.22 – Definição geométrica dos modelos ensaiados [9]

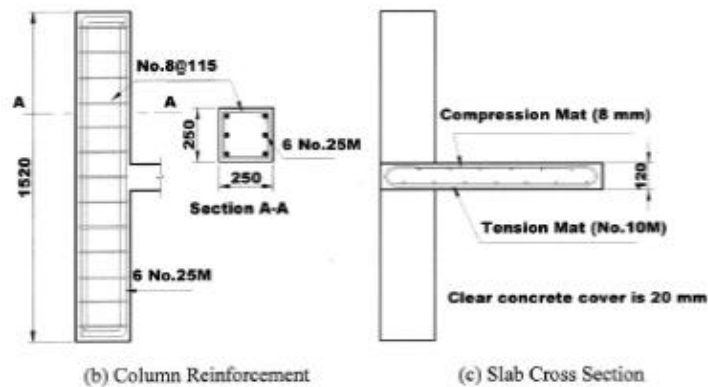


Figura 2.23 – Armaduras dos modelos ensaiadas [9]

Como reforço ao punçoamento para as lajes sem abertura, os autores utilizaram três técnicas distintas, consistindo na aplicação de GFRP, CFRP e GFRP em conjunto com três camadas de parafusos transversais dispostos em volta do pilar. Para este tipo de reforço, as fibras apenas foram coladas na face traccionada (zona superior da laje).

Nas lajes com abertura junto ao pilar de bordo, foram utilizadas duas técnicas, consistindo a primeira na aplicação de GFRP e a segunda na aplicação de GFRP conjuntamente com três camadas de parafusos transversais dispostas em volta do pilar. Nestas lajes, as fibras de vidro foram coladas em forma de U, ou seja, em ambas as faces da laje.

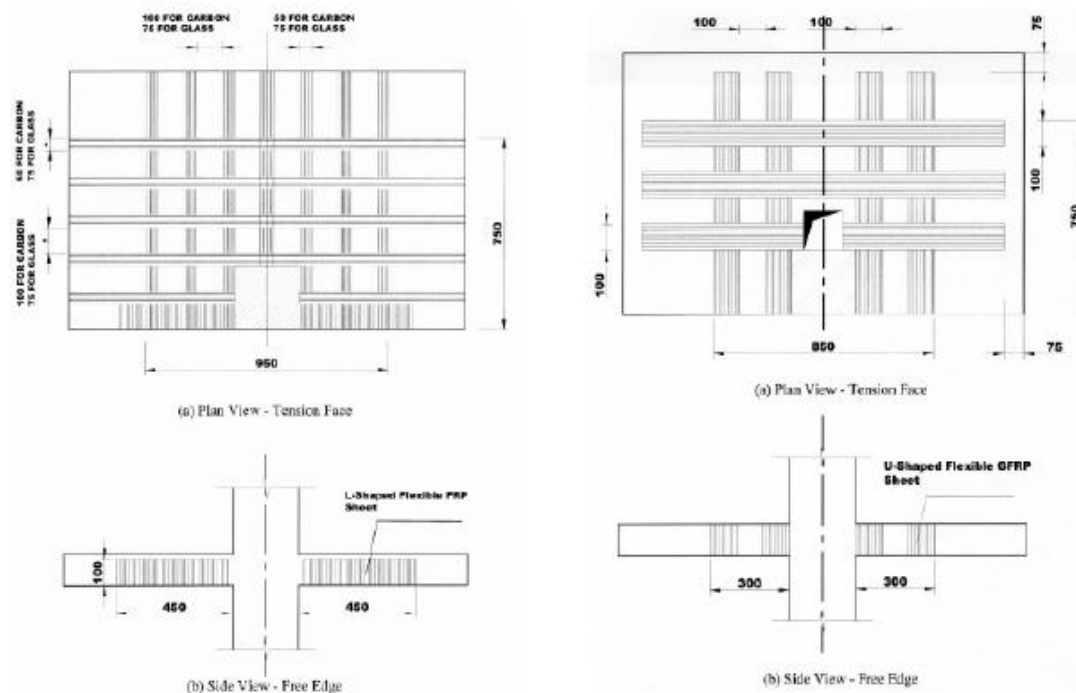


Figura 2.24 – Pormenorização do reforço com FRP [9]

Os parafusos utilizados nas duas lajes (com e sem abertura) foram dispostos de forma circular em volta do pilar em três camadas distintas. A primeira camada foi efectuada a 45 mm da face do pilar (correspondente a $d/2$), a segunda e terceira foram realizadas a 90 mm (correspondente a d) da primeira e segunda, respectivamente. Cada camada de parafusos foi constituída por cinco parafusos, num total de 15 parafusos por laje. A força de pré-esforço inicial aplicada aos parafusos foi de, aproximadamente, 40 % da tensão de cedência do parafuso. Usaram-se placas circulares de 48 mm de diâmetro e 9.5 mm de espessura para a ancoragem dos parafusos de reforço.

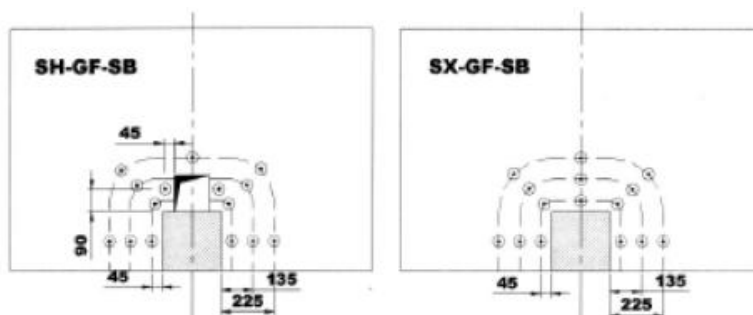


Figura 2.25 – Disposição em planta dos parafusos utilizados no reforço das lajes (com e sem abertura) [9]

Quadro 2.4 – Resumo dos ensaios realizados por El-Salakawy, Soudki e Polak [9]

Série	Laje	% de armadura e de reforço				Observações
		Perpendicular ao bordo livre		Paralela ao bordo livre		
		ρ_s	ρ_r	ρ_s	ρ_r	
1	XXX	0.75	N/A	0.45	N/A	Referência sem abertura
	SFO	0.75	N/A	0.45	N/A	Referência com abertura
2	SX – GF	0.75	0.34	0.45	0.24	1 camada
	SX – CF	0.75	0.05	0.45	0.05	1 camada
	SX – GF - SB	0.75	0.34	0.45	0.24	1 camada + parafusos
3	SH – GF	0.75	0.52	0.45	0.38	2 camadas
	SH – GF - SB	0.75	0.52	0.45	0.38	2 camadas + parafusos

Nota: N/A = não aplicável; h = 120 mm; b = 1540 ou 1020 mm; ρ_s – percentagem de armadura ($\rho_s = A_r / (b h)$); ρ_r – percentagem de reforço; SFO – reforçado com abertura; SX – reforçado sem buraco; SH – reforçado com buraco; GF – com fibras de vidro; CF – com fibras de carbono; SB – com parafusos de aço verticais.

Quadro 2.5 – Resultados dos ensaios realizados por El-Salakawy, Soudki e Polak [9]

Série	Laje	V_{exp} (kN)	Mecanismo de rotura
1	XXX	125	Punçoamento
	SFO	110	Punçoamento
2	SX – GF	130	Punçoamento
	SX – CF	126	Punçoamento
	SX – GF - SB	170	flexão
3	SH – GF	135	Punçoamento
	SH – GF - SB	162	flexão

Nota: N/A = não aplicável; SFO – reforçado com abertura; SX – reforçado sem buraco; SH – reforçado com buraco; GF – com fibras de vidro; CF – com fibras de carbono; SB – com parafusos de aço verticais; V_{exp} – valor de carga experimental

Os autores constataram que a superfície de rotura das lajes reforçadas com GFRP e CFRP se formou aproximadamente à mesma distância das lajes de controlo, verificando-se que a área de FRP utilizado não influenciou a distância da superfície de rotura relativamente à face do pilar.

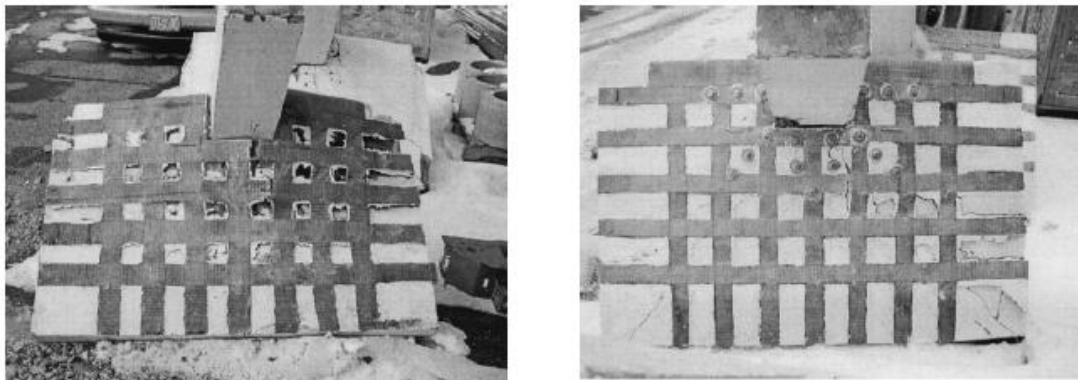


Figura 2.26 – Aspecto final das lajes SX-GF e SX-GF-SB respectivamente [9]

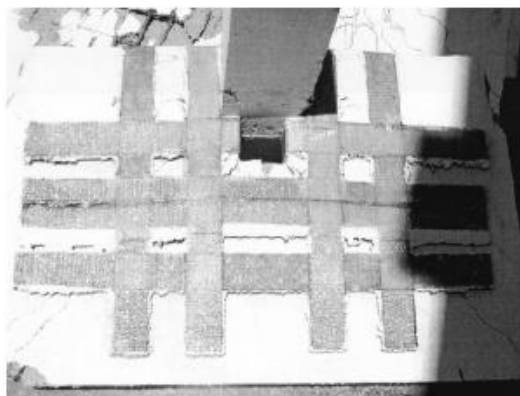


Figura 2.27 – Aspecto final da laje SH-GF [9]

Nas lajes reforçadas apenas com FRP não foi possível observar a fendilhação junto ao pilar durante o ensaio. O mecanismo de rotura destas lajes ocorreu por punçamento, enquanto que nas lajes reforçadas com parafusos transversais pré-esforçados ocorreu por flexão, sendo que houve também deformação das fibras de vidro, apesar de não ter sido observada a rotura das mesmas.

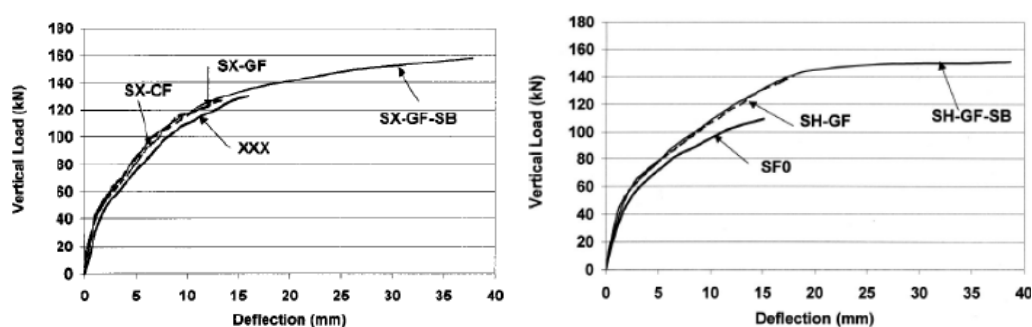


Figura 2.28 – Relação entre a carga aplicada e a deformação das lajes sem abertura [9]

Constatou-se que, utilizando apenas GFRP ou CFRP, o aumento de resistência foi de 2 a 6 % para as lajes com uma camada de fibras, e de 22 % para as lajes com duas camadas, em comparação com os modelos de controlo.

Relativamente às lajes reforçadas com parafusos e fibras de vidro em simultâneo, verificou-se um acréscimo de resistência de 23 % no modelo com uma camada de fibras e de 30 % no modelo com duas camadas. Em relação à deformação, os autores verificaram que as lajes reforçadas com parafusos evidenciaram uma deformação bastante superior em comparação com as restantes.

A utilização dos parafusos aumenta a ductilidade da conexão pilar-laje e altera o modo de rotura da laje, passando de uma rotura por punçamento para uma rotura por flexão.

2.4.5 Ensaios de Harajli, Soudki e Kudsi

Harajli, Soudki e Kudsi [17] estudaram a utilização de laminados de fibras de carbono (CFRP) em conjunto com parafusos como reforço de lajes fungiformes. Os parafusos são utilizados com a finalidade de melhorar o desempenho da laje ao punçoamento e as fibras são usadas para aumentar a resistência à flexão das lajes. Foram utilizadas 26 lajes com dimensões em planta de $670 \times 670 \text{ mm}^2$, apoiadas num pilar central com dimensões $100 \times 100 \text{ mm}^2$. Para além da altura das lajes (55 mm ou 75 mm), as variáveis consideradas nos ensaios foram a percentagem específica de armadura de flexão, a área de FRP, o diâmetro dos parafusos e a sua disposição em planta. As lajes foram apoiadas nos quatro cantos e sujeitas a uma força vertical no centro destas.

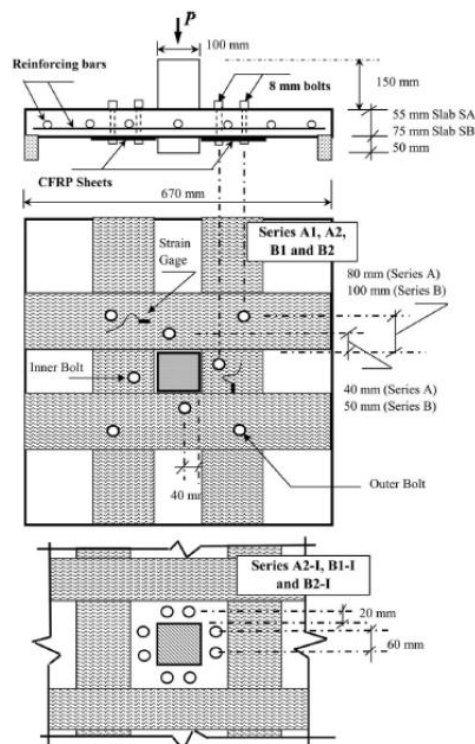


Figura 2.29 – Definição geométrica e pormenorização do reforço das lajes [17]



Figura 2.30 – Pormenor dos parafusos usados por os autores no reforço das lajes fungiformes [17]

Em alguns modelos das séries A1, A2, B1 e B2 foram aplicados oito parafusos em duas camadas, enquanto nas séries A2-I, B1-I e B2-I foram colocados oito parafusos numa só

camada, a uma distância de 20 mm da face do pilar. Todos os parafusos aplicados tinham 8 mm de diâmetro e foram pré-esforçados, sendo a força de pré-esforço transmitida à laje por intermédio de placas de aço de dimensões 40 x 40 x 5 mm³, colocadas em ambas as faces dos modelos.

Quadro 2.6 – Resumo dos ensaios realizados por Harajli, Soudki e Kudsi [17]

Série	Designação	Espessura da Laje (mm)	Armadura longitudinal	Espessura de CFRP (mm)	Número parafusos Ø8 (aço)	f _{cm} (MPa)
A1	SA1 (referência)	55	5Ø8	-	-	26.1
	SA1 - B	55	5Ø8	-	8	28.1
	SA1 - BF	55	5Ø8	100	8	26.1
A2	SA2 (referência)	55	7Ø8	-	-	25.4
	SA2 - B	55	7Ø8	-	8	25.4
	SA2 - BF	55	7Ø8	150	8	32.4
B1	SB1 (referência)	75	5Ø10	-	-	28.1
	SB1 - B	75	5Ø10	-	8	28.1
	SB1 - BF	75	5Ø10	150	8	26.1
B2	SB2 (referência)	75	7Ø10	-	-	32.4
	SB2 - B	75	7Ø10	-	8	25.4
	SB2 - BF	75	7Ø10	150	8	23.4
A2 - I	SA2 - BI	55	7Ø8	-	8	30.5
	SA2 - BFI	55	7Ø8	150	8	31.3
B1 - I	SB1 - BI	75	5Ø10	-	8	30.5
	SB1 - BFI	75	5Ø10	150	8	30.5
B2 - I	SB2 - BI	75	7Ø10	-	8	31.3
	SB2 - BFI	75	7Ø10	150	8	31.3
A1 ^a	A1 (referência) ^a	55	5Ø8	-	-	31.9
	SA1 - F ^a	55	5Ø8	100	-	34.3
A2 ^a	A2 (referência) ^a	55	7Ø8	-	-	31.5
	SA2 - F ^a	55	7Ø8	150	-	35.5
B1 ^a	B1 (referência) ^a	75	5Ø10	-	-	35.5
	SB1 - F ^a	75	5Ø10	150	-	33.0
B2 ^a	B2 (referência) ^a	75	7Ø10	-	-	29.1
	SB2 - F ^a	75	7Ø10	150	-	29.1

Nota : B – utilização de parafusos transversais; F* – utilização de fibras de carbono; BF – utilização de parafusos transversais e fibras de carbono; f_{cm} – valor médio da tensão de rotura à compressão do betão em provetes cilíndricos

Durante os ensaios foram medidos a deformação da laje junto ao pilar, as extensões nos parafusos e as extensões nas fibras de carbono. Os autores examinaram o padrão da fendilhação, o modo de rotura e a posição da superfície de rotura do punçamento.

Devido à diferença de resistência do betão dos vários modelos, a carga aplicada nos vários ensaios foi normalizada segundo a seguinte expressão:

$$V_{exp,n} = \sqrt{\frac{30}{f_{cm}}} \cdot V_{exp} \quad (\text{kN}) \quad (2.1)$$

Em que:

- $V_{exp,n}$ carga de rotura experimental normalizada;
- f_{cm} valor médio da resistência do betão à compressão em provetes cilíndricos para cada um dos modelos;
- V_{exp} carga de rotura experimental.

Todos os modelos apresentaram uma rotura por punçoamento, com excepção das lajes SA1-B que rompeu por flexão e ainda das lajes SB1-B e SB1-BI que obtiveram uma rotura pela conjugação punçoamento-flexão.



Figura 2.31 – Pormenor dos vários tipos de rotura obtidos e da fendilhação na face traccionada [17]

Na laje de controlo SA1, as fendas de punçoamento propagaram-se até uma distância de, aproximadamente, 2.9 h da face do pilar. Para os restantes modelos de controlo (SA2, SB1 e SB2) essa distância situou-se entre 1.6 h e 1.9 h, sendo h a altura da laje.

Nas lajes reforçadas apenas com CFRP não houve uma alteração significativa da superfície de rotura relativamente à laje de controlo. Por sua vez, nas lajes reforçadas apenas com parafusos e simultaneamente com parafusos e CFRP, os autores verificaram que a superfície de rotura se deslocou para o exterior da laje aproximadamente 3 h, quando comparadas com a laje de controlo.

Relativamente à relação carga-deformação, observou-se em todas as lajes uma primeira fase linear até ao início da fendilhação, seguida de uma ligeira redução da rigidez antes da rotura dos modelos.

Os autores constataram que a utilização de parafusos como reforço de lajes fungiformes providencia um aumento entre 6 a 24 % na capacidade resistente das mesmas, dependendo do tipo de laje e da configuração dos parafusos. Nos modelos em que a rotura se deu por flexão ou pela conjugação punçamento-flexão, a rotura foi precedida por uma fase inelástica devido à cedência da armadura ordinária das lajes. Segundo os autores, ficou comprovado que a utilização de parafusos como reforço de lajes fungiformes melhorou significativamente a ductilidade da laje. Quando as lajes foram reforçadas apenas com CFRP a carga última de punçamento aumentou entre 16 % e 32 % comparativamente com a laje de controlo respectiva. Como o CFRP não tem resistência ao punçamento, as melhorias verificadas são atribuídas ao facto de as fibras de carbono limitarem a abertura das fendas, bem como aumentarem a resistência à flexão das lajes.

Da mesma forma, os autores verificaram que a combinação entre parafusos e CFRP como reforço providencia às lajes uma resistência adicional superior a qualquer outro tipo de reforço considerado pelos mesmos. As lajes reforçadas com parafusos e CFRP em conjunto obtiveram um aumento da carga resistente entre 26 % e 77 %.

Outra das conclusões do estudo é o melhor comportamento ao punçamento das lajes reforçadas com oito parafusos dispostos em duas camadas, em comparação com as lajes reforçadas com oito parafusos dispostos numa só camada. Contudo, verificou-se que o aumento da tensão nos parafusos até à carga de rotura da laje é relativamente baixo, e a sua tensão final é consideravelmente inferior à tensão de cedência dos mesmos.

2.4.6 Ensaios de Duarte

Duarte [6, 7] optou por estudar separadamente o efeito da quantidade de armadura transversal (diâmetro dos parafusos) e o efeito da variação de pré-esforço aplicado nos parafusos de reforço na resistência ao punçamento de lajes fungiformes maciças.

Foram elaborados e testados cinco modelos experimentais com dimensões em planta de 1800 x 1800 mm² e 120 mm de espessura. Os modelos foram designados de ID1 (modelo de referência), a ID5. Os modelos ID2 a ID5 foram reforçadas com dezasseis parafusos transversais, obtidos de varões roscados, dispostos em duas camadas de oito em torno do pilar.

As armaduras longitudinais de flexão, superior e inferior, foram determinadas com a finalidade de se obter uma rotura por punçamento, sendo a armadura superior constituída por uma malha quadrada de Ø10//0.075 m e a inferior por uma malha quadrada de Ø6//0.20 m. A armadura superior, com a maior altura útil, é a orientada na direcção “N-S”. O recobrimento utilizado foi de, aproximadamente, 20 mm na face superior e 10 mm na face inferior.

O modelo ID1 foi carregado até ser atingida a sua rotura por punçamento, tendo sido utilizado como modelo de referência. Os modelos ID2 a ID5 foram previamente

carregados até se atingir um nível considerável de fendilhação por flexão, tendo sido aplicada cerca de 60 % da carga última obtida na laje de referência (ID1). Após as lajes terem sido fendilhadas, foram descarregadas e reforçadas.

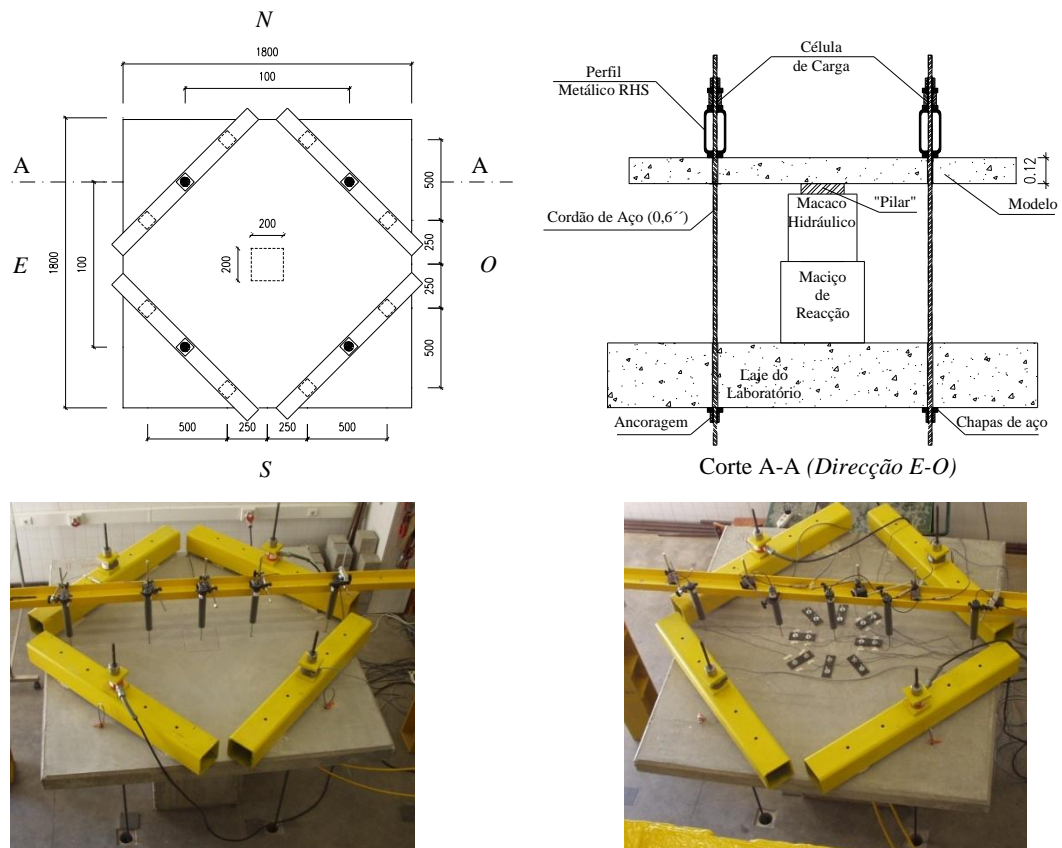


Figura 2.32 – Pormenor da geometria dos modelos e sua condição de fronteira [6]

O método de reforço utilizado consistiu em inserir parafusos verticais obtidos a partir de varões roscados, sendo estes posteriormente pré-esforçados e ancorados por chapas contra as faces da laje.

O reforço foi realizado através de dezasseis parafusos colocados em duas camadas em torno do pilar. A primeira camada encontrava-se a 0.5 d do pilar e a segunda a 0.75 d da primeira. As forças dos parafusos eram transmitidas ao betão através de placas de aço de 5 mm de espessura, superior e inferiormente, que serviam de ancoragem aos dois parafusos distribuindo a força de pré-esforço na área da chapa. A posição dos parafusos transversais pré-esforçados pode ser vista na Figura 2.32 e Figura 2.33.

A secção média dos parafusos M10, M8 e M6 tinham uma zona lisa e uniforme com um diâmetro de 7.7 mm, 6 mm e 4.6 mm, respectivamente, onde foram colados extensómetros, de forma a ser medida a evolução da força nos parafusos (Figura 2.33). Os parafusos depois de colocados com as respectivas chapas, foram então pré-tensionados com uma pré-carga inicial por parafuso de 11.2 kN (ID2-M10), 2.9 kN (ID3-M6), 6.7 kN (ID4-M8) e 1.4 kN (ID5-M8). Por fim, os modelos foram carregados até à rotura.

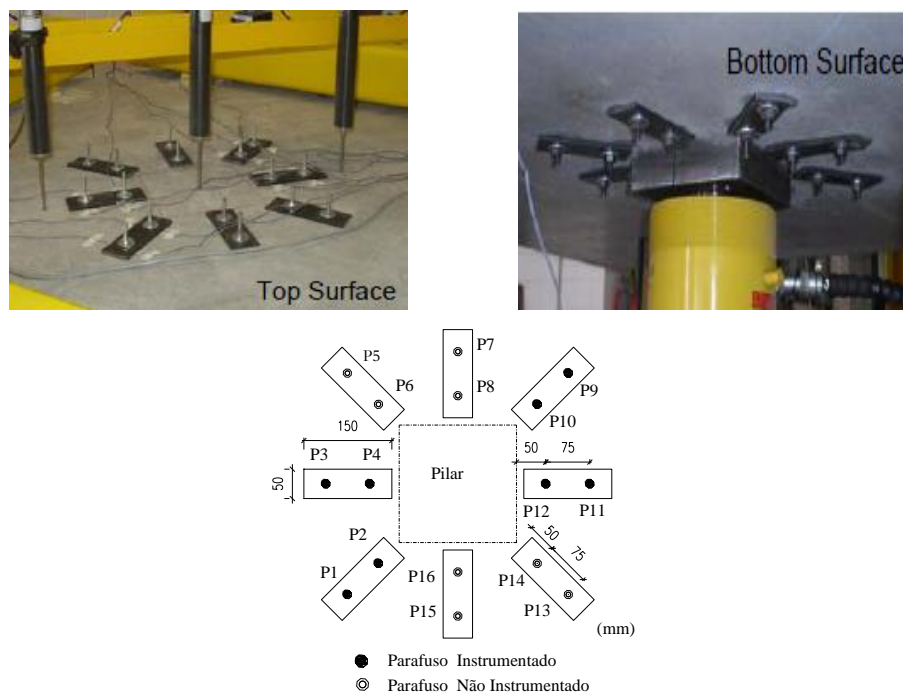


Figura 2.33 – Pormenor da geometria e posição dos elementos de reforço ao punçamento [6]

Ao longo de todo o ensaio, foram medidas: a evolução da força instalada nos parafusos, os deslocamentos verticais em 5 pontos e a carga aplicada ao modelo. Todos os modelos apresentaram uma rotura por punçamento e a sua carga última (V_{exp}), incluindo o seu peso próprio, é apresentada no Quadro 2.7.

Quadro 2.7 – Resumo de ensaios experimentais [6]

Modelo	Parafusos de reforço	Força inicial média nos parafusos (kN)	V_{exp} (kN)	$V_{exp} / V_{exp,R}$
ID1	-	-	269.0	1.0
ID2	M10	11.2	405.9	1.51
ID3	M6	3.3	330.8	1.23
ID4	M8	5.9	380.7	1.41
ID5	M8	1.4	366.3	1.36

Nota : V_{exp} – carga de rotura experimental; $V_{exp,R}$ – carga de rotura correspondente ao modelo ID1 (referência)

Duarte observou que o uso de parafusos verticais no reforço transversal levou a um incremento no valor da carga de rotura ao punçamento. Quando comparados com o modelo de referência, obteve incrementos de resistência que variam entre 23 % usando parafusos M6, e 50 % quando usados os M10. Ao diminuir o valor inicial de pré-esforço aplicado aos parafusos de 6.7 kN (Modelo ID4) para 1.4 kN (Modelo ID5) resultou numa pequena diferença de 4 % em relação à carga de rotura.

O incremento da força de pré-esforço aumentou a resistência ao punçoamento em 8 % e provocou uma alteração da posição da superfície de rotura, que passou do interior para o exterior deste.

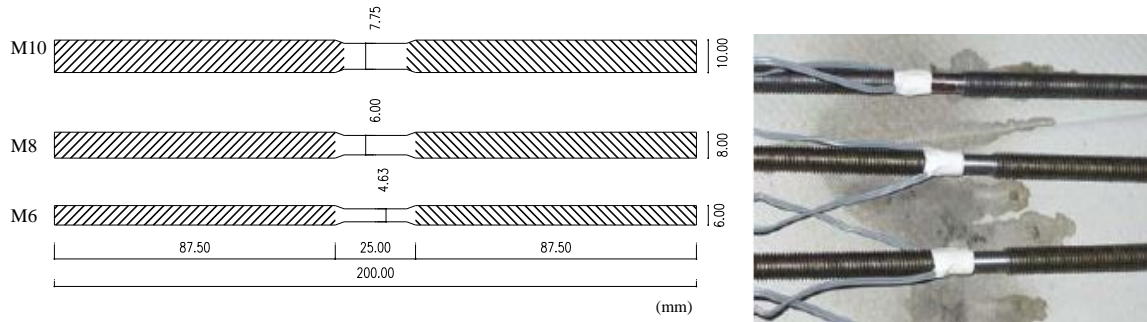


Figura 2.34 – Pormenor da geometria dos parafusos usados (dimensões em mm) [6]

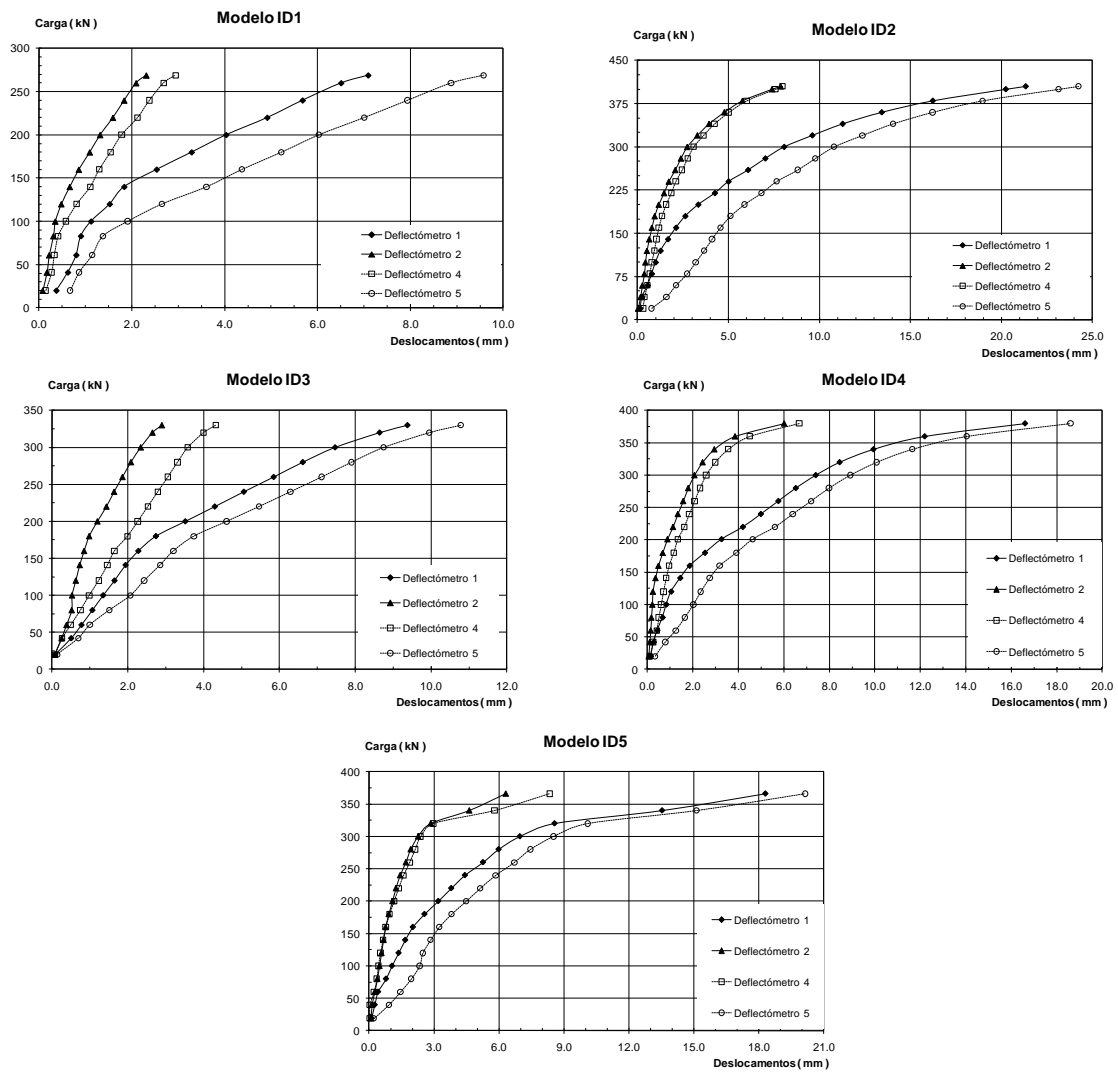


Figura 2.35 – Evolução dos deslocamentos verticais com a carga aplicada dos vários modelos [6]

Foram colocados cinco deflectómetros em cinco pontos da laje que permitiram determinar os deslocamentos relativos em relação ao centro dos modelos. A evolução dos deslocamentos nos respectivos modelos, em função da carga vertical até à rotura é apresentada na Figura 2.35.

É possível constatar que a utilização de parafusos de reforço, nos modelos ID2 a ID5, conduz a uma diminuição da deformação vertical para o mesmo nível de carga, em comparação com o modelo de referência ID1, logo uma maior rigidez dos modelos.

Após a realização dos ensaios e remoção do betão da zona do cone de punçoamento, foi possível observar e registar as inclinações das superfícies de rotura com a horizontal.

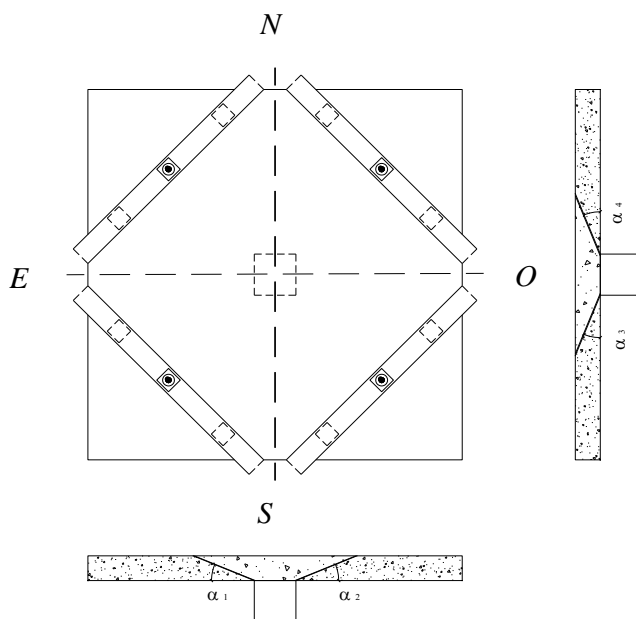


Figura 2.36 – Inclinações da superfície de rotura com a horizontal [6]

Observando o Quadro 2.8, verifica-se um aumento do ângulo de inclinação da superfície de rotura com a utilização de parafusos no reforço dos modelos, mas sem grande influência nos diâmetros dos parafusos em relação ao seu valor final.

Em termos gerais e de acordo com os resultados experimentais, o autor verificou que esta técnica de reforço não só é simples e de rápida execução, como é bastante eficaz no aumento da resistência ao punçoamento.

Quadro 2.8 – Inclinações da superfície de rotura com a horizontal [6]

Modelo	$(\alpha_1 + \alpha_2)/2$ (°)	$(\alpha_3 + \alpha_4)/2$ (°)	α médio (°)
ID1	30	32	31
ID2	43	45	44
ID3	40	39	40
ID4	46	44	45
ID5	40	43	42

Nota: α – ângulo formado pelas armaduras específicas de punçoamento com o plano da laje

2.4.7 Ensaios de Luís

Luís [26, 27] executou e ensaiou 5 modelos. Quatro destes reforçados com introdução de parafusos transversais pré-esforçados, sendo o restante utilizado como modelo de referência não reforçado. Como objectivos, Marta pretendeu verificar as alterações de comportamento, modo de rotura e resistência, entre ensaios com carregamento monotónico e cíclico.

Todos os modelos, excepto o modelo de referência, foram reforçados com parafusos verticais pré-esforçados. Esta técnica de reforço, assim como todos os modelos, é em tudo idêntica à do autor Duarte [6], já descrita anteriormente.

Todos os modelos reforçados com parafusos verticais foram sujeitos a carregamentos crescentes até ser atingida a sua rotura por punçoamento. Dois foram sujeitos a um carregamento monotónico e os outros dois sujeitos a carregamentos cíclicos.

Os modelos apresentam dimensões em planta de $1800 \times 1800 \text{ mm}^2$, e uma espessura de 120 mm. A armadura superior dos modelos foi constituída por uma malha quadrada de $\text{Ø}10//0.075 \text{ m}$ e uma malha quadrada de $\text{Ø}6//0.20 \text{ m}$. O recobrimento foi de aproximadamente de 20 mm na face superior e 10 mm na face inferior.

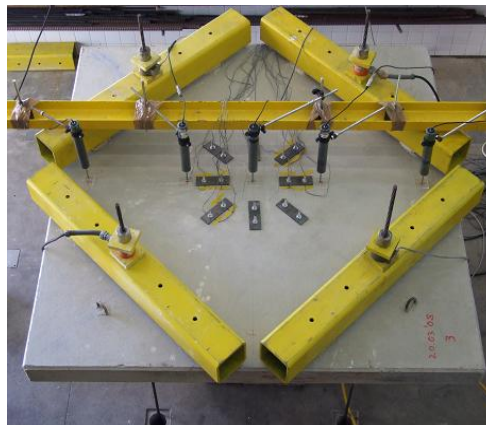


Figura 2.37 – Aspecto geral de um dos ensaios de M. Luís [26]

Os modelos foram designados por R, M6, M8, C6 e C8, onde R representa o modelo que servirá de referência, M6 e M8 designa os modelos com os parafusos do mesmo tipo sujeitos a um carregamento monotónico, e por fim C6 e C8 designam os modelos sujeitos a um carregamento cíclico com os parafusos do tipo M6 e M8, respectivamente.

O modelo de referência (R) foi sujeito a um carregamento monotónico até ser atingida a sua rotura por punçoamento. Todos os restantes modelos, foram sujeitos a duas fases de carregamento.

Numa primeira fase fendilhados através da aplicação de uma carga de aproximadamente 160 kN, correspondente a cerca de 60 % da carga de rotura do modelo de referência (não reforçado). Esta carga foi aplicada ao pilar através de um macaco hidráulico. Após ter sido

atingido este valor para o carregamento vertical, o autor procedeu à descarga das lajes e às operações de reforço (segunda fase).

Foram então colocados dezasseis parafusos transversais, obtidos a partir de varões roscados, em duas camadas em torno do pilar. Estes foram ancorados às faces inferior e superior com placas de aço e $150 \times 50 \text{ mm}^2$ e espessura de 5 mm (Figura 2.33). Foram utilizados parafusos M8 e M6, iguais aos utilizados por Duarte [6].

O pré-esforço foi aplicado aos parafusos através de uma chave dinamométrica. As forças médias iniciais nos parafusos foram de 2.9 kN nos modelos M6 e C6 em que foram utilizados parafusos M6 e 6.7 kN nos modelos M8 e C8 com parafusos M8.

Os modelos R, M6 e M8 foram levados à rotura através da aplicação de uma carga monotónica no pilar central, e, os modelos C6 e C8 foram carregados ciclicamente. O carregamento cíclico foi efectuado em 3 ciclos da mesma carga, mantendo a carga inferior de cada ciclo nos 160 kN e fazendo acréscimos sucessivos de 10 kN nos valores de pico.

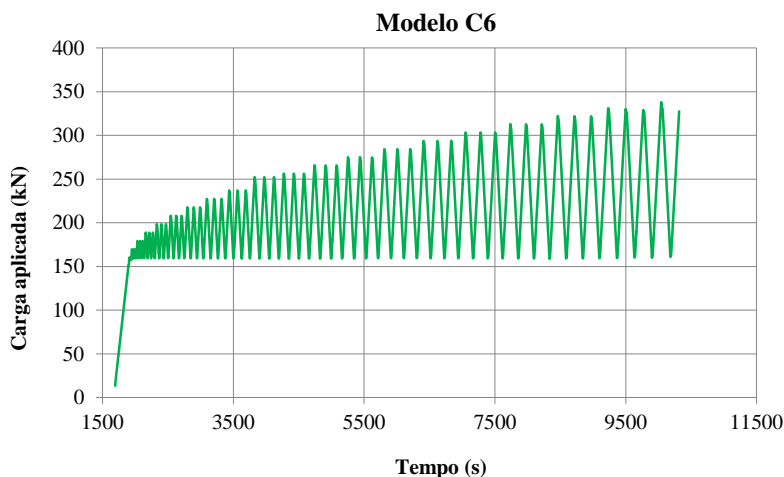


Figura 2.38 – Ciclos de carga aplicado ao modelo C6 [26]

Segundo o autor, todos os modelos atingiram a rotura por punçamento. As respectivas cargas de rotura experimental, incluindo o peso próprio (V_{exp}) são apresentadas no Quadro 2.9.

Nos modelos C6 e M6 a rotura deu-se pelo reforço. Nos modelos C8 e M8 a superfície de rotura foi exterior ao reforço, tendo intersectado a face em compressão fora da área da laje que continha os parafusos de reforço.

Pelo Quadro 2.9, verifica-se que existe um incremento de resistência originado pelo reforço da laje com parafusos verticais. Este incremento foi de 20 % nos modelos reforçados com os parafusos de 6 mm de diâmetro e cerca de 32 % nos reforçados com parafusos de 8 mm de diâmetro. A alteração do tipo de carregamento (monotónico ou cíclico) não influenciou de forma clara o valor de carga de rotura.

Quadro 2.9 – Resumo de ensaios experimentais [26]

Carregamento	Modelo	Parafusos de reforço	Força inicial média nos parafusos (kN)	V_{exp} (kN)	$V_{exp} / V_{exp,R}$
Monotónico	R	-	-	269	1.00
	M6	M6	2.9	331	1.23
	M8	M8	6.7	381	1.42
Cíclico	C6	M6	2.9	337	1.25
	C8	M8	6.7	349	1.30

Nota : V_{exp} – carga de rotura experimental; $V_{exp,R}$ – carga de rotura correspondente ao modelo R (referência)

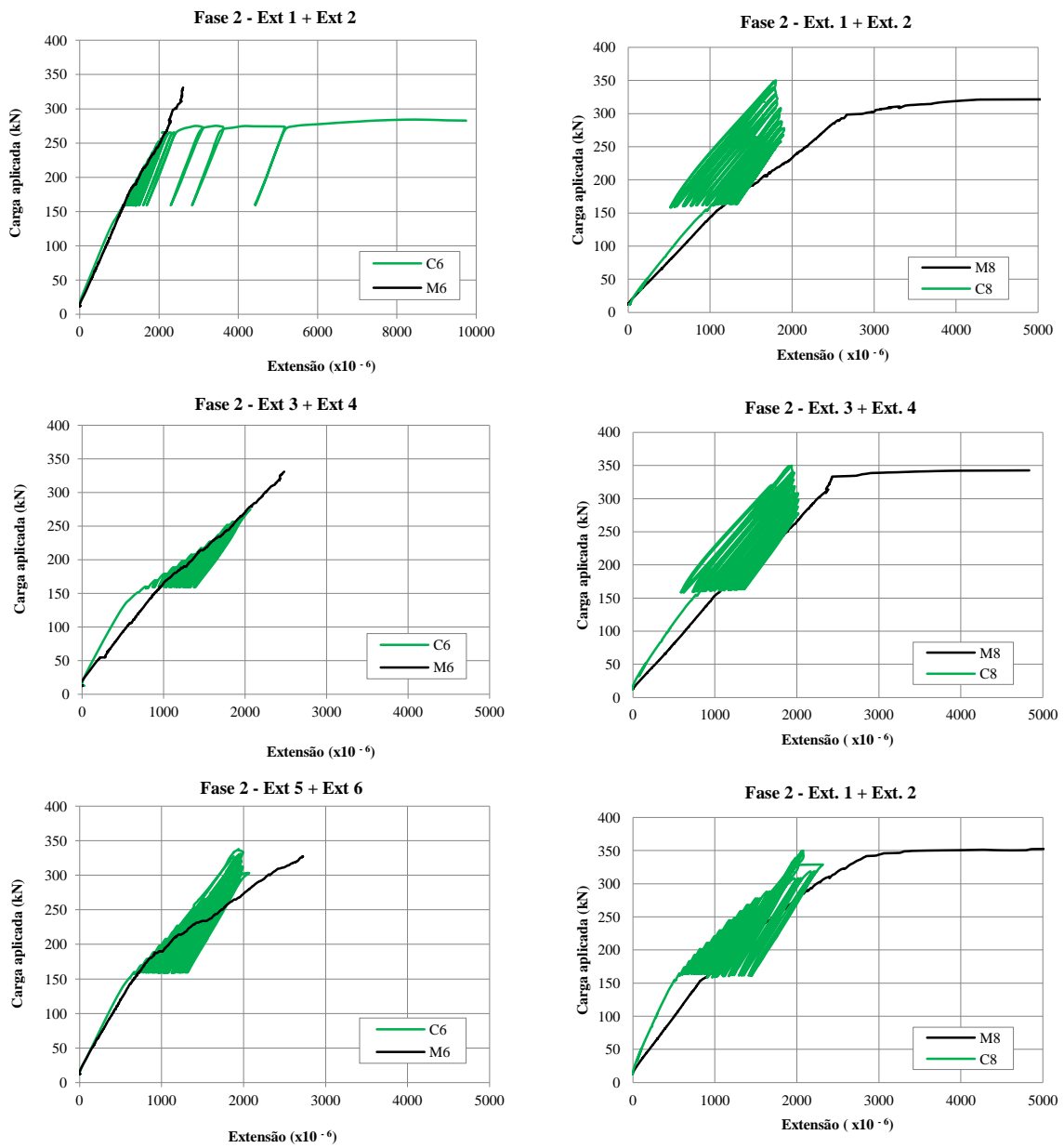


Figura 2.39 – Evolução das extensões das armaduras longitudinais superiores, nos modelos M6 e C6 (à esquerda) e M8 e C8 (à direita), Fase 2 [26]

Na figura anterior, verificamos que a introdução dos parafusos de reforço conduz a uma diminuição das extensões nas armaduras superiores, tanto nos modelos com carregamento monotónico como cíclico, não existindo diferenças significativas nesta grandeza entre os tipos de carregamentos. As distribuições transversais de extensão, são em geral, as expectáveis, com valores mais elevados nos varões mais próximos do pilar.

Em termos de deslocamentos verticais, Luís observou por intermédio das deformadas que as rotações se concentram mais junto ao pilar, produzindo deformações plásticas, originadas pela forte fendilhação tangencial nesta zona. À medida que a distância ao centro do pilar aumenta, a deformada tem um comportamento sensivelmente linear.

Na Figura 2.40, apresentam-se os gráficos de deslocamento máximo em função da relação entre a carga aplicada e a carga de rotura, para os modelos reforçados com o mesmo tipo de reforço e em comparação com o modelo de referência

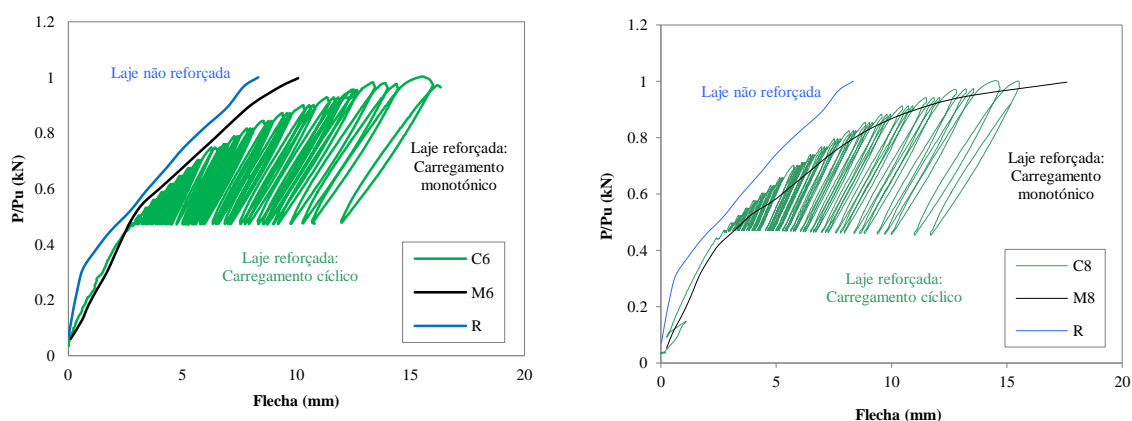


Figura 2.40 – Flecha dos modelos R, C6 e M6, e R, C8 e M8 [26]

No Quadro 2.10 apresentam-se os deslocamentos verticais máximos registados na direcção x (média dos valores registados nos deflectómetros 1 e 5) para uma carga vertical de 200 kN e 250 kN.

Quadro 2.10 – Deslocamentos em 2 patamares de carga [26]

Modelo	Parafuso de Reforço	Força inicial nos parafusos (kN)	V _{exp} (kN)	Deslocamentos (mm)	
				V = 200 kN	V = 250 kN
Monotónico	R	-	269	5.0	7.3
	M6	3.3	331	4.1	6.1
	M8	5.9	381	3.9	6.1
Cíclico	C6	4.3	337	4.9	7.0
	C8	4.6	349	3.9	6.0

Comparando o modelo de referência com os restantes modelos, Luís verificou que a aplicação dos parafusos verticais de reforço diminui os deslocamentos verticais nas extremidades dos modelos, tanto nos modelos com carregamento monotónico como nos modelos com carregamento cíclico. Logo, regista-se um aumento de rigidez nos modelos reforçados por este processo.

Em geral, e para o mesmo nível de carga, a deformação nos modelos ensaiados com carregamento cíclico foi superior em comparação com os monotónicos. Isto significa que para um dado carregamento cíclico, ou sob acção sísmica, existe uma ligeira perda de rigidez. Contudo de uma forma geral, foi possível verificar que esta técnica aumenta razoavelmente a rigidez dos modelos, em comparação com o modelo de referência, e independentemente do tipo de carregamento a que foram sujeitos.

Após a realização dos ensaios e remoção do betão da zona do cone de punçoamento, foi possível observar e registar as inclinações das superfícies de rotura com a horizontal.

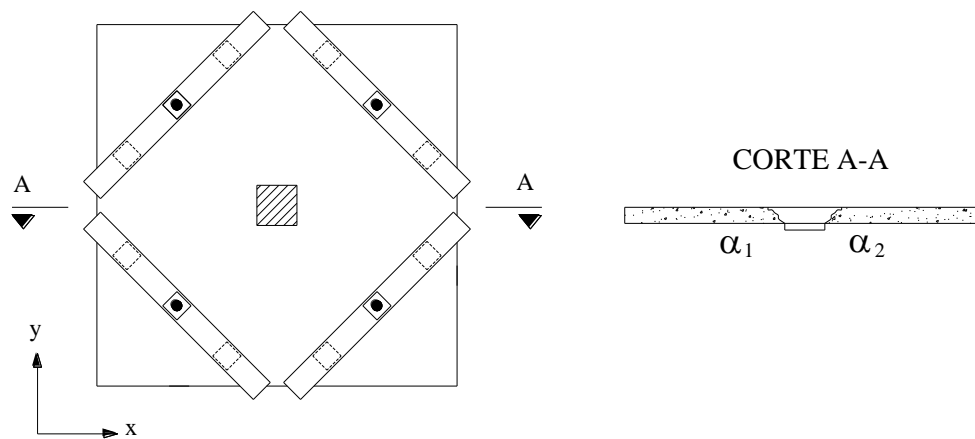


Figura 2.41 – Inclinações da superfície de rotura com a horizontal [26]

Observando o Quadro 2.11, verifica-se um aumento do ângulo de inclinação da superfície de rotura com a utilização de parafusos no reforço dos modelos, com um ligeiro aumento do ângulo para carregamentos monotónicos em comparação com os cíclicos.

Quadro 2.11 – Inclinações da superfície de rotura com a horizontal [26]

Modelo	$(\alpha_1 + \alpha_2)/2$ (°)
R	30
M6	40
M8	46
C6	39
C8	41

Nota: α – ângulo formado pelas armaduras específicas de punçoamento com o plano da laje

2.4.8 Ensaios de Muttoni

Muttoni tem vindo a estudar os fenómenos do punçamento desde a última década, existindo já uma vasta panóplia de artigos por ele publicados referentes a este fenómeno [33, 35], quer em vigas, lajes ou outros elementos de betão armado.

No que a lajes diz respeito, e em concreto, em lajes fungiformes, Muttoni realizou algumas experiências em modelos à escala. Inicialmente sem qualquer tipo de reforço, tendo posteriormente aplicado algumas soluções de reforço descritas no ponto 2.3 deste capítulo. O estudo destas técnicas permitiu obter diversas conclusões que serão descritas e apresentadas seguidamente sobre dois resumos de análises experimentais por ele realizados.

O primeiro, em 16 modelos de laje à escala real, onde se pretende analisar a variação de parâmetros como o tamanho do pilar, espessura da laje, área de reforço e tipo de sistema de reforço aplicado; sendo posteriormente comparados os valores obtidos com os regulamentos em vigor. Este ensaio será designado por Muttoni, A. - Ensaio a).

O segundo, em 6 modelos mas agora variando apenas o tipo de reforço aplicado, sendo constante a área dos modelos a ensaiar, assim como a percentagem de reforço aplicada, independentemente do tipo de reforço escolhido. Da mesma forma, as propriedades do betão são próximas, variando pouco (f_c entre 28.4 MPa e 36.8 MPa). Este ensaio será designado por Muttoni, A. - Ensaio b).

Muttoni, A. – Ensaio a) [33]

Dezasseis modelos à escala real foram ensaiados com o intuito de investigar a variação de parâmetros, tais como, o tamanho do pilar, a espessura da laje, a percentagem de reforço e o sistema de reforço aplicado.

Todos os modelos tinham dimensões em planta de 3000 x 3000 mm², uma percentagem de armadura de flexão de 1.5 %, sendo suportados por um pilar rectangular.

Para o estudo da variação dos vários parâmetros, a campanha experimental foi dividida em três séries. A primeira estudou a influência da variação do pilar pela relação entre o tamanho do pilar e a espessura efectiva da laje (c/d), que variou de 0.62 a 2.48. A segunda série investigou a influência da espessura da laje, que variou de 250 mm a 400 mm, mantendo constante o rácio c/d de 1.24. A terceira série investigou a taxa de armadura transversal de reforço, ρ_w , na secção crítica definida de acordo com a norma SAI 262 (2003) [44].

Adicionalmente, as séries, um e dois, foram realizadas com dois sistemas de reforço diferentes: um constituído por pinos verticais e outro por estribos contínuos, tal como apresentado na Figura 2.42.

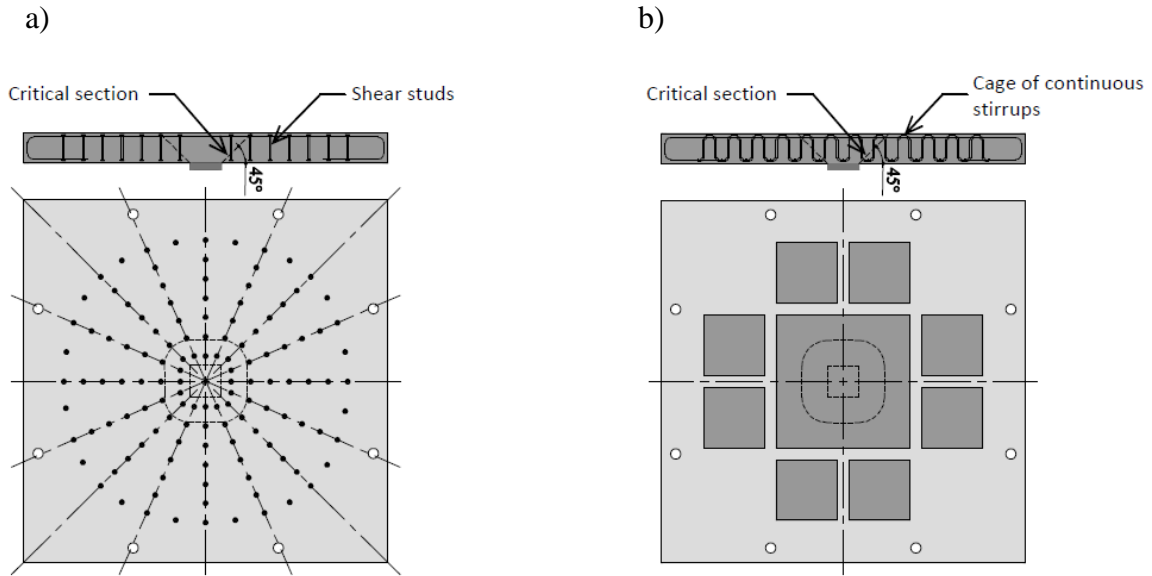


Figura 2.42 – Definição da secção crítica e traçado do reforço transversal: (a) pinos transversais e (b) estribos contínuos [33]

A força aplicada foi introduzida por quatro macacos hidráulicos na face inferior. Foram colocadas e distribuídas quatro barras ao longo da laje e ligadas a quatro vigas de aço. Estas barras serviram para aplicar uma pré-carga às lajes na sua zona superior.

O pilar foi materializado por intermédio de chapas quadradas de aço.

O Quadro 2.12 apresenta um resumo dos parâmetros gerais dos modelos analisados.

Quadro 2.12 – Parâmetros dos modelos ensaiados [33]

Modelo	h (mm)	c (mm)	d (mm)	ρ_l (%)	ρ_w (%)	Tipo de Reforço
PL1	250	130x130	210	1.50	-	-
PL6	250	130x130	210	1.50	0.99	Pinos
PF1	250	130x130	210	1.50	0.79	Estribos
PG1	250	260x260	210	1.50	-	-
PL7	250	260x260	210	1.50	0.91	Pinos
PF2	250	260x260	210	1.50	0.79	Estribos
PL3	250	520x520	210	1.50	-	-
PL8	250	520x520	210	1.50	0.85	Pinos
PF3	250	520x520	210	1.50	0.79	Estribos
PL4	320	340x340	274	1.53	-	-
PL9	320	340x340	274	1.53	0.87	Pinos
PF4	320	340x340	274	1.53	0.79	Estribos
PL5	400	440x440	354	1.50	-	-
PL10	400	440x440	354	1.50	0.79	Pinos
PF5	400	440x440	354	1.50	0.79	Estribos
PL11	250	260x260	210	1.50	0.23	Pinos
PL12	250	260x260	210	1.50	0.47	Pinos

Nota: h – comprimento em planta dos modelos quadrados; c – dimensão do pilar; d – altura útil; ρ_l – percentagem de armadura longitudinal; ρ_w – percentagem de armadura transversal de reforço ($\rho_w = A_{sw} / (S_l * S_t)$); A_{sw} – área da secção de reforço; S_l – distância entre dois reforços transversais na direcção longitudinal; S_t – distância entre dois reforços transversais na direcção transversal;

Ao longo dos ensaios foram monitorizados e registados os resultados da rotação dos modelos, deslocamentos e a sua deformação, assim como os esforços exercidos na armadura de reforço transversal.

Na Figura 2.43, apresentam-se as curvas de rotação em função da carga aplicada aos modelos.

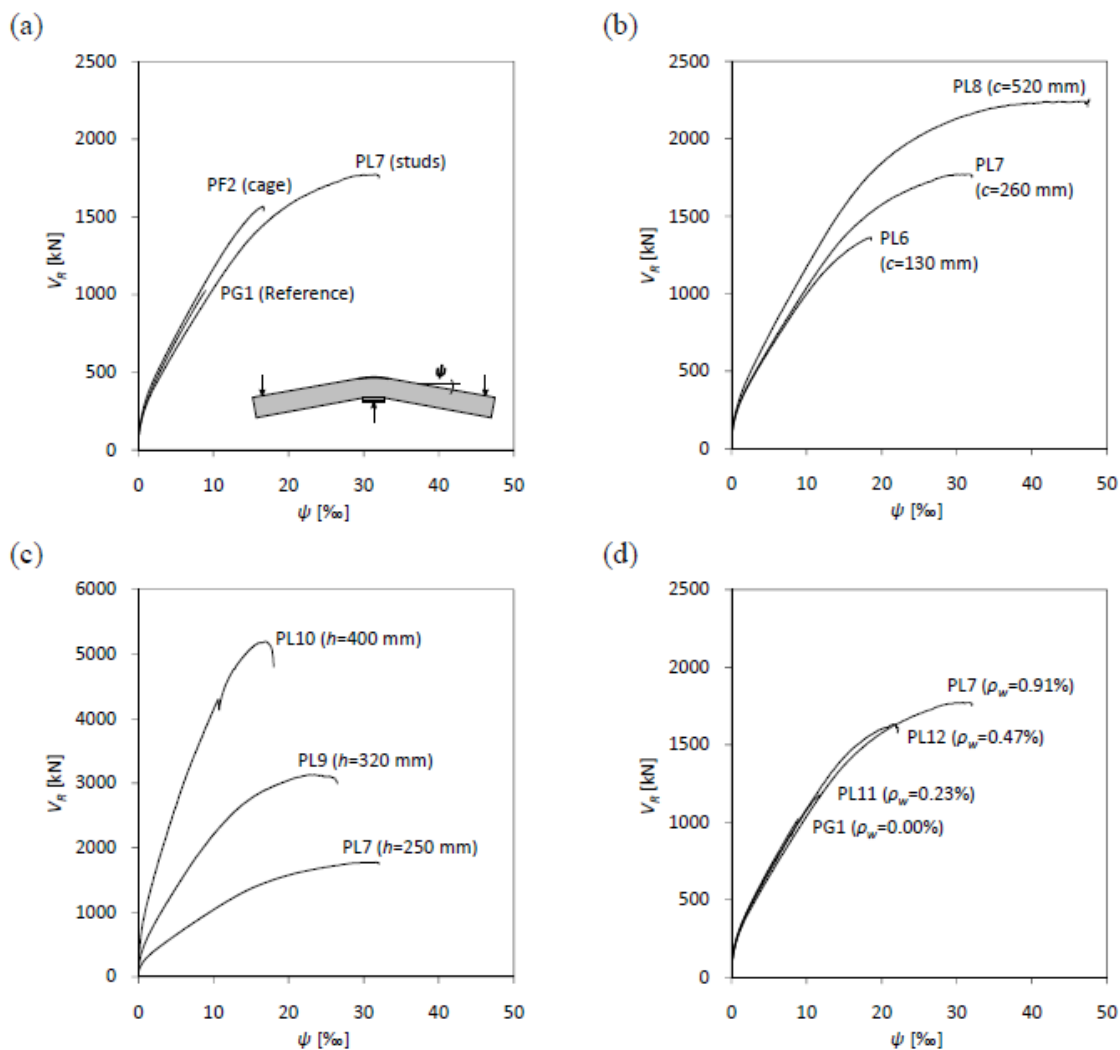


Figura 2.43 – Curva de Rotação – Carregamento: (a) variação do sistema de reforço; (b) variando a dimensão do pilar; (c) variando a espessura da laje, h ; (d) variando a percentagem de armadura de reforço, ρ_w [33]

Pela Figura 2.43 a), verificamos que o desempenho das lajes é tanto melhor quando sujeitas a reforço. De facto, o reforço aumenta significativamente a capacidade de rotação e resistência dos modelos.

O modelo de laje PL7, com reforço por pinos verticais, comporta-se de uma forma mais dúctil e atinge uma superior resistência em comparação com o modelo de referência e o modelo com o reforço por estribos contínuos.

Observando a Figura 2.43 b), podemos observar o desempenho dos modelos quando sujeitos a uma variação do tamanho do pilar, simulado por uma chapa de aço. Tal como seria de esperar, quanto maior a dimensão do pilar maior a capacidade resistente e capacidade de rotação dos modelos a fenómenos de punçoamento. Este fenómeno, segundo o autor, é facilmente observável pelo modelo PL8, onde e apesar de este ter atingido a sua capacidade resistente à flexão, não ocorreu uma rotura por punçoamento, mesmo sujeito a grandes rotações.

Comparando agora o desempenho dos modelos quando sujeitos a diferentes espessuras efectivas de lajes, pela Figura 2.43 c), verificamos que enquanto a capacidade resistente da laje aumenta, a sua capacidade de rotação diminui em virtude do incremento de rigidez do modelo na sua relação rotação – carga aplicada. Este fenómeno também seria de esperar, uma vez que com o aumento da espessura dos modelos obteríamos uma menor deformação dos mesmos, logo, uma menor rotação, na sua relação com a carga aplicada.

Na situação de variação da quantidade de armadura transversal de reforço, Figura 2.43 d), verifica-se, que o aumento de armadura corresponde a um comportamento aproximado entre o aumento da sua capacidade resistente e aumento da sua rotação pelo aumento de carga. Mesmo com uma pequena percentagem de armadura transversal, verifica-se um incremento da capacidade resistente e de rotação do modelo PL11 em relação ao modelo de referência PG1.

Em termos de rotura, todos os modelos atingiram uma rotura por punçoamento com excepção do modelo PL8. A forma da rotura por punçoamento foi idêntica nos modelos, tendo sido entre a armadura de reforço nos modelos PL11 e PL12, e interior ao reforço (próximo do pilar) nos restantes.

A carga última experimental dos modelos foi comparada com a carga de rotura prevista nos regulamentos SAI 262 (2003) [44], ACI 318 (2008)[1], EN EC2 (2004) [8], e pela teoria da carga última de punçoamento [34].

Por intermédio da Figura 2.44, poderemos observar o rácio entre o valor da carga última experimental dos modelos analisados e o valor segundo os regulamentos anteriormente descritos, para a variação de armadura transversal de reforço, ρ_w .

Como nota, não serão apresentados os valores para o modelo PL8, visto não ter tido uma rotura por punçoamento, como referido anteriormente; e, COV representa o coeficiente de variação.

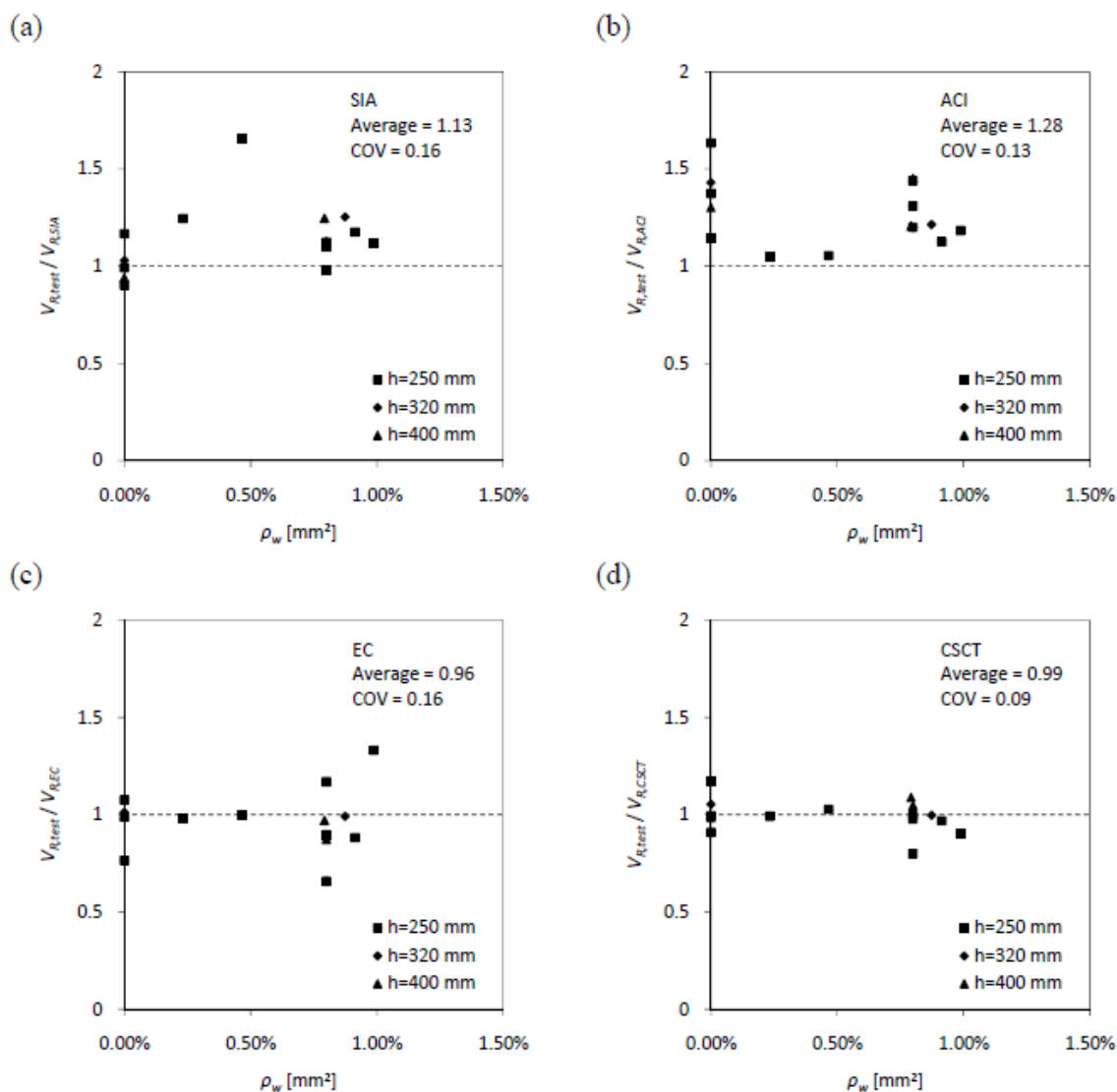


Figura 2.44 – Rácio entre $V_{R, \text{test}}$ e $V_{R, \text{teórico}}$ de acordo com: (a) SAI 262; (b) ACI 318; (c) EC2; (d) CSCT [33]

Por intermédio dos modelos ensaiados e analisados, o autor conclui que:

- o uso de armadura transversal de reforço ao punçoamento conduz a incrementos de capacidade de resistência e rotação na ligação pilar-laje;
- Usando pinos verticais, a resistência é duas vezes superior ao modelo sem reforço, assim como a sua rotação (três vezes superior);
- O incremento de resistência e capacidade de rotação ao punçoamento depende de vários factores, principalmente pela quantidade e sistema de reforço;
- Os pinos verticais têm um melhor desempenho em comparação com estribos contínuos;
- A comparação entre regulamentos mostra que, geralmente, os códigos de prática corrente conduzem a resultados inseguros (EN EC2 (2004)), dispersos (ACI 318 (2008) e algo conservadores (SAI 262 (2003) e ACI 318 (2008)).
- A teoria de rotura por punçoamento demonstra resultados positivos quando comparados com os resultados obtidos experimentalmente.

Muttoni, A. – Ensaio b) [35]

Seis modelos de laje foram ensaiados com o objectivo de se estudar o comportamento entre sistemas de reforço ao punçoamento.

Todos os modelos tinham as mesmas propriedades geométricas e mecânicas (observe-se Figura 2.45 e Quadro 2.13), sendo a percentagem de armadura longitudinal de 1.5 % e a altura útil (d) de 210 mm.

O pilar foi materializado por intermédio de uma chapa de aço quadrada (260 x 260 mm²)

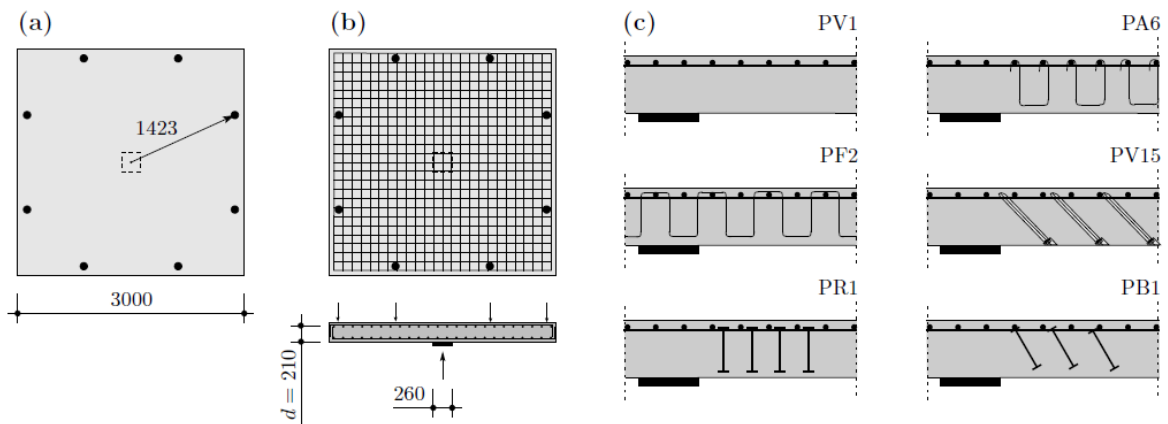


Figura 2.45 – Modelos ensaiados: (a) geometria; (b) disposição do reforço; (c) esboço dos sistemas de reforço utilizados [35]

O Sistema de reforço consistiu em cinco tipos diferentes. Reforço por estribos contínuos a uma determinada distância do pilar (modelo PV6), estribos contínuos desde o centro do pilar (modelo PF2), armadura transversal oblíqua por intermédio de buchas químicas ancoradas inferiormente (modelo PV15), armadura transversal por intermédio de pinos (modelo PF2), armadura transversal oblíqua por intermédio de pinos (modelo PB1); servindo o modelo PV1 de modelo de referência.

Quadro 2.13 – Propriedades mecânicas dos modelos ensaiados [35]

Modelo	ρ_w (%)	f_c (MPa)	f_y (MPa)	f_{yw} (MPa)	V_R (kN)	Ψ_R (%)	$\frac{V_R}{b_0 d_v \sqrt{f_c}}$ (-)
PV1	-	34.0	709	-	974	0.76	0.470
PA6	1.01	33.8	N/A	N/A	1345	N/A	0.648
PV15	0.95	36.8	527	547	1609	3.11	0.741
PF2	0.80	32.0	583	500*	1567	1.83	0.776
PR1	1.04	31.0	515	580	1654	1.98	0.832
PB1	1.04	28.4	576	388	1960	2.35	1.030

Nota: ρ_w – percentagem de armadura de reforço; f_c – tensão do betão à compressão; f_y – tensão de cedência das armaduras longitudinais; f_{yw} – tensão de cedência das armaduras transversais de reforço; V_R – carga de rotura experimental; Ψ_R – rotação da laje correspondente a V_R ; N/A – não disponível; * – característica nominal da tensão do aço (valores dos modelos não ensaiados)

Todos os modelos foram carregados monotonicamente até ser atingida a rotura por punçamento, tendo o modelo de referência (PV1) desenvolvido uma forma clássica de punçamento, com o cone próximo da região de suporte.

Os modelos PV15, PR1, PA6 e PF2 obtiveram uma rotura por esmagamento do betão próxima do “pilar” (interior ao reforço). A rotura dos modelos PV15 e PR1 deu-se após os modelos serem sujeitos a grandes deformações.

O modelo PB1 foi o que obteve o maior incremento de resistência associado à maior sollicitação da zona de compressão. Contudo, a sua zona de rotura por punçamento foi exterior ao reforço.

Apresenta-se em seguida a curva de rotação em função do carregamento, normalizado segundo Muttoni.

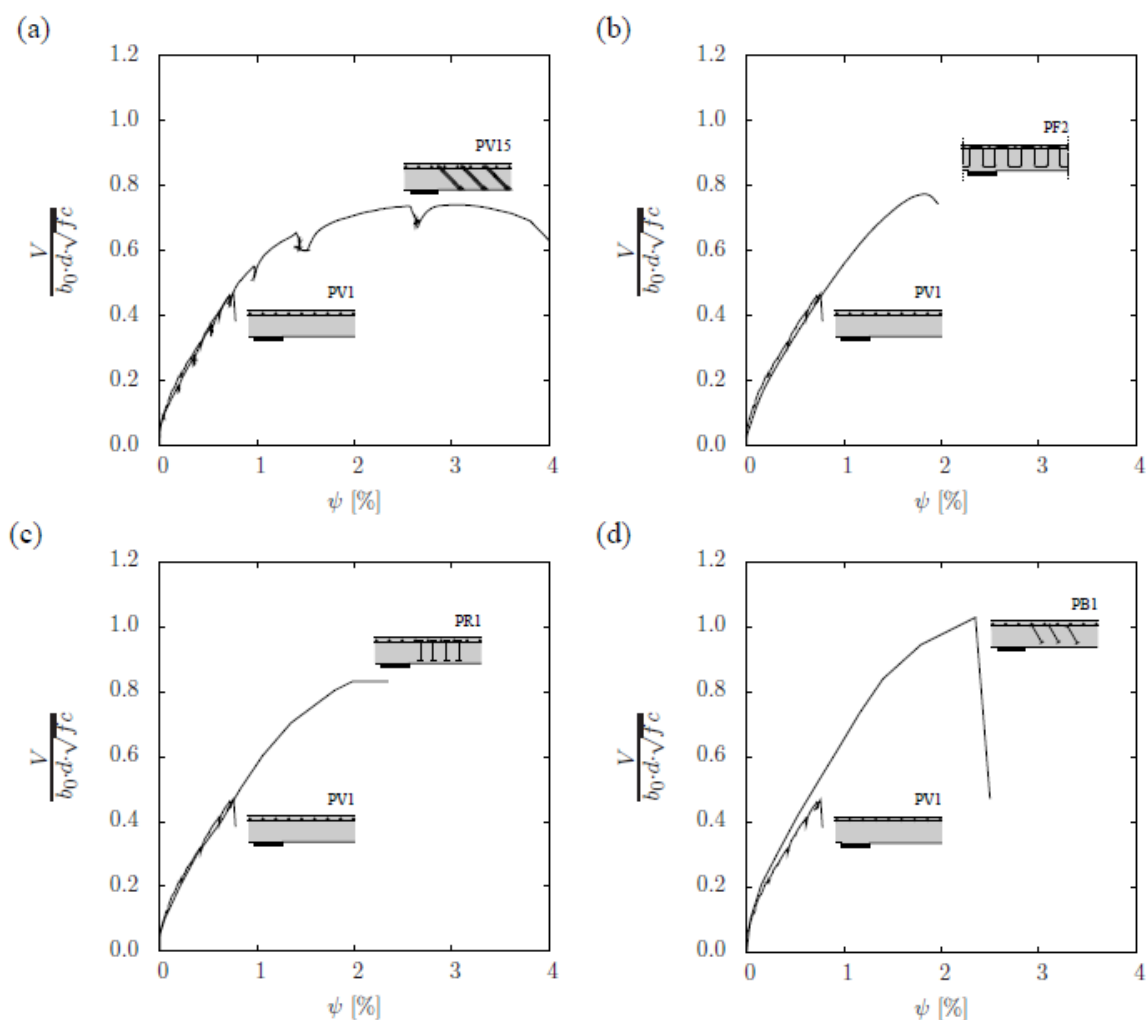


Figura 2.46 – Curva de Rotação – Carregamento: (a) PV1 e PV15; (b) PV1 e PF2; (c) PV1 e PR1; (d) PV1 e PB1 [35]

Observando a Figura 2.46 e Figura 2.47, verificamos capacidades de resistência e rotação, em relação à rotura por punção, bem diferenciadas, consoante o tipo de sistema utilizado no reforço dos modelos.

O modelo PA6, com um sistema de reforço por estribos contínuos, apresentou o pior desempenho, com um incremento de 38 % de carga última em relação ao modelo de referência.

O modelo PV15, com um reforço por pós-instalação de buchas químicas ancoradas na zona inferior da laje, apresenta o melhor comportamento / desempenho, com um incremento de 57 % de carga última em relação ao modelo de referência, mas associado a uma grande deformação até atingir a rotura, logo, um modelo mais dúctil. Tal comportamento deve-se ao bom desempenho das resinas epoxídica e ao desenvolvimento da capacidade resistente criada pela ancoragem na base do modelo (Figura 2.46 (a)).

Utilizando estribos contínuos como sistema de reforço (modelo PF2) permite um incremento significativo de resistência (cerca de 70 %) mas associado a uma rotura mais frágil.

Utilizando pinos como elementos de reforço, estes exibem a superior capacidade resistente e de deformação, quer seja como armadura vertical (77 % de incremento), quer seja como armadura inclinada (119 % de incremento), observe-se Figura 2.46 (c) e (d).

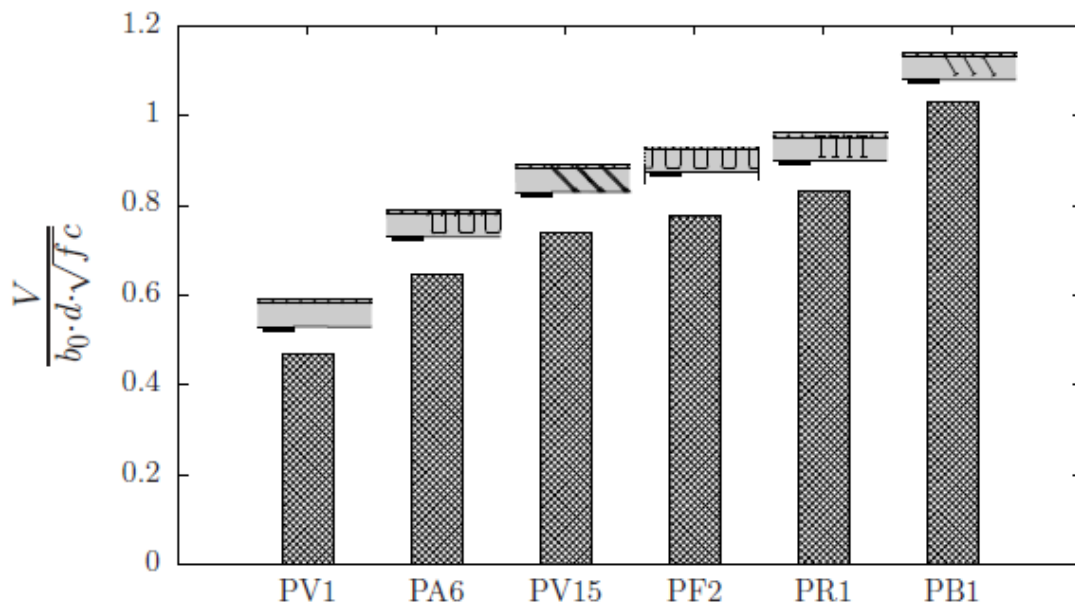


Figura 2.47 – Comparação entre cargas de rotura normalizadas [35]

O autor concluiu que:

- A forma de rotura é altamente influenciada por regras detalhadas, condições de ancoragem e de desenvolvimento (que segundo o autor deveriam ser tidas em consideração com um factor λ);
- Sistemas com ancoragens de maior desempenho (ancoradas por chapas, usualmente) exibem uma superior capacidade resistente associada a uma superior deformação (maior ductilidade).
- Sistemas de pinos apresentam uma superior eficácia em relação a estribos contínuos e buchas químicas ancoradas na zona inferior;
- Armadura inclinada é uma forma efectiva de incrementar a capacidade resistente ao punçoamento de lajes fungiformes;
- A ligação aderente (pós-instalada) com agentes de ligação epoxídica, não só aumenta significativamente a capacidade de deformação da laje, como ainda assim, incrementa a capacidade resistente para um valor notável face à deformação imposta.
- São necessários ensaios experimentais de forma a chegarmos ou convergirmos para um valor de coeficiente λ seguro ou realista, e eventualmente serem propostos métodos de reforço ao punçoamento para projecto.

2.5 REGULAMENTAÇÃO

De seguida, apresentam-se as regras preconizadas por alguns códigos e regulamentos no que se refere ao cálculo da resistência ao punçoamento. Estes regulamentos apresentam expressões obtidas empiricamente que limitam a tensão de corte num determinado perímetro de referência. Serão seguidamente apresentados por ordem cronológica.

2.5.1 REBAP

No regulamento Português REBAP [39], o perímetro do contorno de referência é definido por uma linha fechada envolvendo a área carregada a uma distância não inferior a $d/2$ e cujo perímetro é mínimo, tal como representado na figura seguinte.

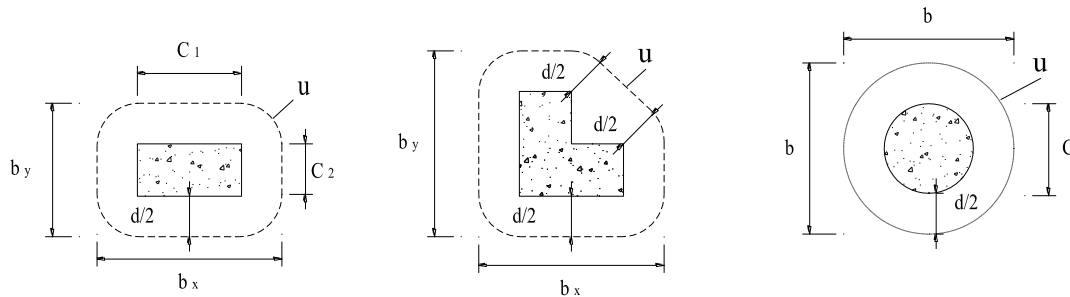


Figura 2.48 – Perímetro de contorno de referência em redor da área carregada (REBAP) [39]

O valor de cálculo do esforço resistente de punçoamento, V_{Rd} , no caso de não existirem armaduras específicas para resistir a este esforço, é dado por:

$$V_{Rd} = \eta \cdot \tau_1 \cdot u \cdot d \quad (2.2)$$

Sendo:

$$\eta = (1.6 - d) \geq 1 \quad (d \text{ em metros}) \quad (2.3)$$

$$\tau_1 = 0.6 \frac{f_{ctk}}{\gamma_c} \quad (2.4)$$

u Perímetro de contorno de referência

d altura útil

f_{ctk} valor característico da resistência à tracção

Quando existe pré-esforço que origine tensões de compressão no plano da laje, o valor de cálculo do esforço resistente de punçoamento é calculado pelo V_{Rd} multiplicado pelo seguinte factor:

$$1 + \frac{M_0}{M_{sd}} \leq 2 \quad (2.5)$$

Em que:

M_0 momento de descompressão da secção

M_{sd} Valor de cálculo do momento actuante

Ao esforço de punçoamento actuante pode ser subtraída a componente vertical do pré-esforço dos cabos que passam dentro do perímetro do contorno de referência, para o caso de lajes pré-esforçadas com cabos inclinados.

A armadura de pré-esforço, segundo este regulamento, não intervém no cálculo da percentagem geométrica da armadura de flexão, visto se considerar um valor fixo de 1 % para esta grandeza.

Caso existam armaduras específicas de punçoamento, o valor de cálculo do esforço resistente ao punçoamento será determinado através da seguinte expressão:

$$V_{Rd} = \frac{4}{3} \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{syd} \cdot \text{sen}\alpha \quad (2.6)$$

Em que:

f_{syd} valor de cálculo da tensão de cedência do aço limitada a 350 MPa;

α ângulo formado pelas armaduras específicas de punçoamento com o plano da laje;

A_{sw} área transversal da armadura específica de punçoamento

s espaçamento entre armaduras

De uma forma simplista, O REBAP limita o esforço resistente ao punçoamento, nos casos em que existe armadura específica, a 1.6 vezes o valor do esforço resistente calculado para a situação da laje sem armadura específica de punçoamento.

2.5.2 CEB - FIP Model Code de 1990

O CEB-FIP Model Code de 1990 (MC90) [10] define o contorno de referência, u , por uma linha fechada que dista $2d$ da área carregada e cujo perímetro é mínimo, como poderemos ver na figura seguinte.

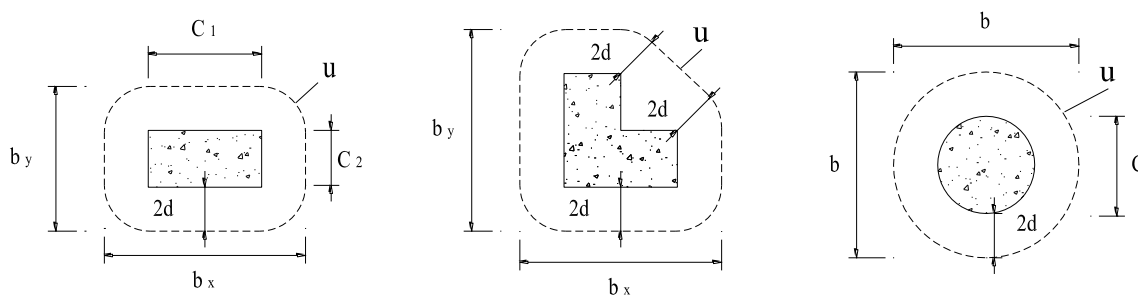


Figura 2.49 – Perímetro do contorno de referência em redor da área carregada (MC90) [10]

O valor da resistência ao punçoamento sem armaduras específicas é calculado pela seguinte expressão:

$$V_{Rd} = 0.12 \xi (100 \rho f_{ck})^{1/3} u d \quad (2.7)$$

Onde:

$$\xi = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \quad (d \text{ em mm}) \quad (2.8)$$

f_{ck} Valor característico da resistência à compressão do betão em provetes cilíndricos (MPa) limitada a 50 MPa ;

$$\rho = \sqrt{\rho_{ly} \rho_{lz}} \leq 0.02 \quad (2.9)$$

$\rho_{ly} \rho_{lz}$ percentagens geométricas das armaduras de flexão da laje segundo y e z, respectivamente. Estes valores devem ser calculados como valores médios numa largura igual à do pilar adicionada de 2d para cada lado.

Nos casos em que existam armaduras específicas de punçoamento, o valor de cálculo do esforço transversal é determinado pela seguinte expressão:

$$V_{Rd} = 0.09 \xi (100 \rho f_{ck})^{1/3} u d + 1.5 \frac{d}{s_r} A_{sw} f_{syd} \text{ sen} \alpha \quad (2.10)$$

s_r afastamento radial entre camadas de armadura;

f_{syd} valor de cálculo da tensão de cedência do aço limitada a 300 MPa;

α ângulo formado pelas armaduras específicas de punçoamento com o plano da laje;

Na expressão 2.7 o valor de f_{ck} deve ser limitado a 50 MPa.

O limite máximo para a resistência ao punçoamento é dado por:

$$V_{Rd} \leq 0.5 f_{cd2} u_0 d \quad (2.11)$$

Onde :

$$f_{cd2} = 0.6 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) f_{cd} \quad (2.12)$$

f_{cd} valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão;

u_0 perímetro da área carregada.

2.5.3 ACI 318 – 08

Neste documento [1], o contorno de referência é definido a uma distância $d/2$ do pilar ou área carregada (Figura 2.50).

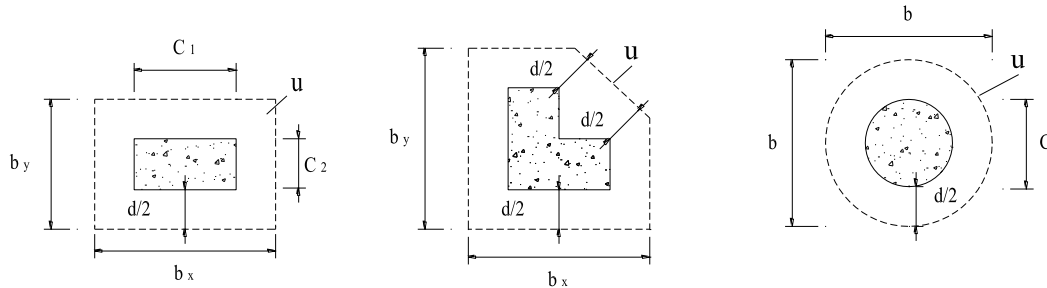


Figura 2.50 – Perímetro de contorno de referência em redor da área carregada (ACI 318-08) [1]

Para lajes fungiformes sem armadura específica, a resistência ao punçamento é definida como sendo o menor dos valores obtidos pelas seguintes expressões:

$$V_{Rd} = \left(1 + \frac{2}{\beta_c}\right) \frac{\sqrt{f_{ck}} u d}{6} \varnothing_c \quad (2.13)$$

$$V_{Rd} = \left(\gamma_s \frac{d}{u} + 2\right) \frac{\sqrt{f_{ck}} u d}{12} \varnothing_c \quad (2.14)$$

$$V_{Rd} = \left(\frac{1}{3}\right) \sqrt{f_{ck}} u d \varnothing_c \quad (2.15)$$

Em que:

β_c quociente entre o lado maior e o lado menor do pilar

\varnothing_c coeficiente de segurança do betão ($\varnothing_c = 0.85$)

$$\alpha_s = \begin{cases} 40 & \text{para pilares interiores} \\ 30 & \text{para pilares de bordo} \\ 20 & \text{para pilares de canto} \end{cases}$$

Caso existam armaduras específicas de punçamento o ACI 318–08 define o valor de cálculo do esforço resistente ao punçamento como sendo:

$$V_{Rd} = \left(\frac{1}{6} \sqrt{f_{ck}} u d \gamma_c + A_{sw} f_{syd} \text{sen} \alpha\right) \varnothing_c \quad (2.16)$$

Respeitando o seguinte valor limite:

$$A_{sw} f_{syd} \text{sen} \alpha \leq \left(\frac{1}{3}\right) \sqrt{f_{ck}} u d \quad (2.17)$$

Nas duas últimas expressões a tensão de cedência do aço utilizado na armadura de punçamento não deve ultrapassar o valor de 414 MPa.

2.5.4 Eurocódigo 2

A verificação ao Estado Limite de Resistência ao punçoamento é efectuada garantindo que o efeito da acção (E_d) não excede a resistência correspondente (R_d).

$$E_d \leq R_d$$

O efeito da acção corresponde ao valor de cálculo da máxima tensão de corte por punçoamento (v_{Ed});

O valor de cálculo da resistência é determinado em duas zonas distintas:

- A tensão de corte correspondente à resistência à compressão no perímetro do pilar de apoio, ou perímetro da carga concentrada, ($v_{Rd,max}$);

$$v_{Ed} \leq v_{Rd,max}$$

- e a tensão de corte correspondente à resistência num perímetro de controle, calculado sem armaduras específica de punçoamento ($v_{Rd,c}$) ou com armadura de punçoamento ($v_{Rd,cs}$).

$$v_{Ed} \leq v_{Rd,c} \quad \text{ou} \quad v_{Ed} \leq v_{Rd,cs}$$

O Eurocódigo 2 [8] indica que o perímetro de contorno de referência deve ser considerado a uma distância de $2d$ da área carregada, ou do perímetro do pilar, como indicado na figura seguinte. Este perímetro deve ser construído de modo a minimizar o seu comprimento.

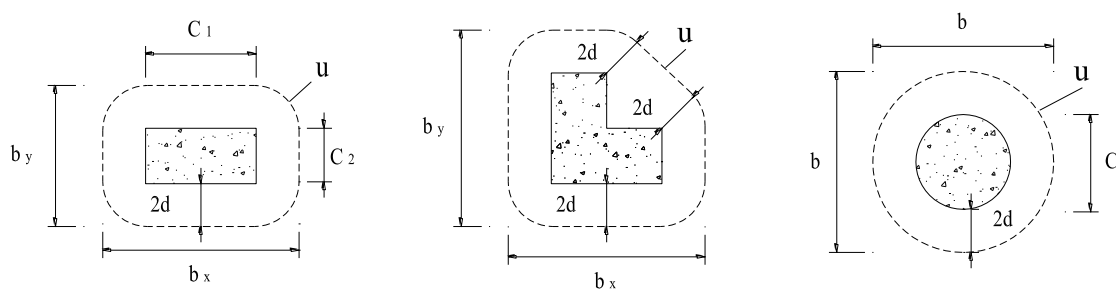


Figura 2.51 – Perímetro do contorno de referência considerado no Eurocódigo 2 [8]

O valor de cálculo da tensão de corte correspondente à resistência ao punçoamento num perímetro de contorno, sem armaduras específicas é dado pela seguinte expressão:

$$v_{Rd,c} = \frac{0.18}{\gamma_c} k (\rho_l f_{ck})^{1/3} \geq 0.035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2} \quad (2.18)$$

Em que:

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \quad (d \text{ em mm}) \quad (2.19)$$

$$\rho = \sqrt{\rho_{ly} \rho_{lz}} \leq 0.02 \quad (2.20)$$

ρ_{ly} ρ_{lz} percentagens geométricas das armaduras de flexão da laje segundo x e y, respectivamente. Estes valores devem ser calculados como valores médios numa largura igual à do pilar adicionada de 3d para cada lado.

f_{ck} valor característico do betão

γ_c coeficiente de segurança do betão ($\gamma_c=1.5$)

Quando existem armaduras de punçamento, o valor de cálculo da tensão de corte correspondente à resistência ao punçamento num perímetro de controle, é calculado pela seguinte expressão:

$$V_{Rd,cs} = 0.75 V_{Rd,c} + 1.5 \frac{d}{s_r} A_{sw} f_{ywd,ef} \frac{\sin\alpha}{u d} \quad (2.21)$$

Onde :

$f_{ywd,ef}$ valor de cálculo da tensão efectiva de cedência do aço e pode ser determinada pela expressão:

$$f_{ywd,ef} = 250 + 0.25 d \leq f_{ywd} \quad (\text{MPa}) \quad (2.22)$$

α ângulo formado pelas armaduras específicas de punçamento com o plano da laje;

A_{sw} área transversal das armaduras específicas de punçamento;

s_r afastamento radial entre camadas de armaduras específicas de punçamento.

d altura útil da laje;

u perímetro do contorno de referência.

Capítulo 3

O EFEITO DA ADERÊNCIA NA RESISTÊNCIA AO PUNÇOAMENTO

3.1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo tem por objectivo o estudo do efeito da aderência na resistência ao punçoamento de lajes fungiformes reforçadas com parafusos transversais. Reforço esse, por intermédio de parafusos transversais pré-esforçados, que atravessam a laje em toda a sua espessura numa determinada área pré-definida. Para tal, serão comparados resultados entre técnicas de reforço com parafusos roscados pré-esforçados aderentes e não aderentes, assim como resultados experimentais obtidos com os valores preconizados pelo EC2 [8], pelo ACI 318 – 08 [1] e obtidos por Duarte [6, 7] e Luís [26, 27].

3.2 DESCRIÇÃO DOS MODELOS ENSAIADOS

Os modelos à escala foram produzidos pela CONCREMAT, S.A., sendo posteriormente ensaiados no Laboratório de Estruturas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Estes modelos simulam, exclusivamente, a área de laje junto ao pilar, limitada pelas linhas de inflexão, onde os momentos flectores são nulos.

Os modelos de laje fungiforme maciça consistem em painéis quadrados de laje de betão armado com dimensões em planta de $1800 \times 1800 \text{ mm}^2$ e 120 mm de espessura, sendo o pilar central simulado por uma placa de aço de $200 \times 200 \text{ mm}^2$ e 50 mm de espessura.

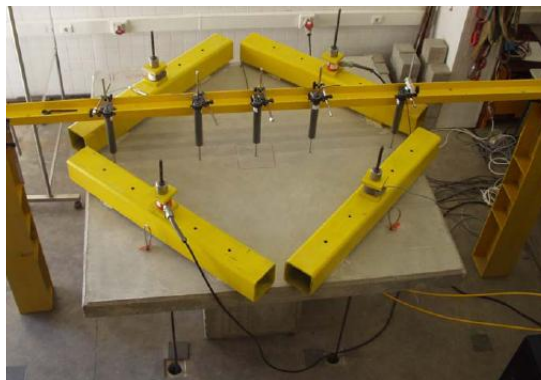


Figura 3.1 – Aspecto geral dos modelos

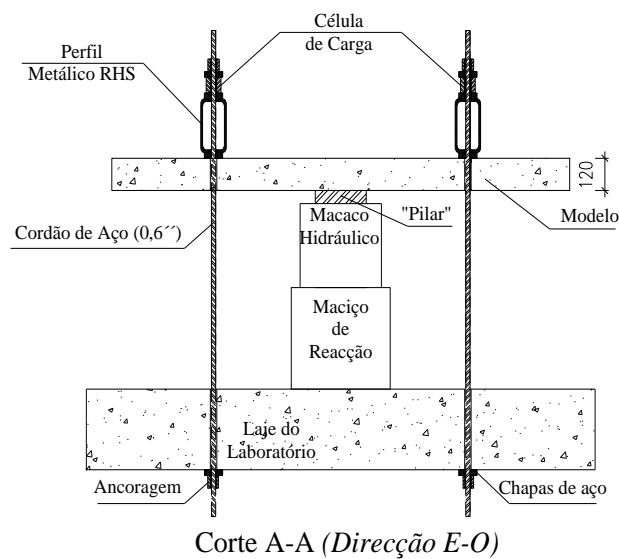
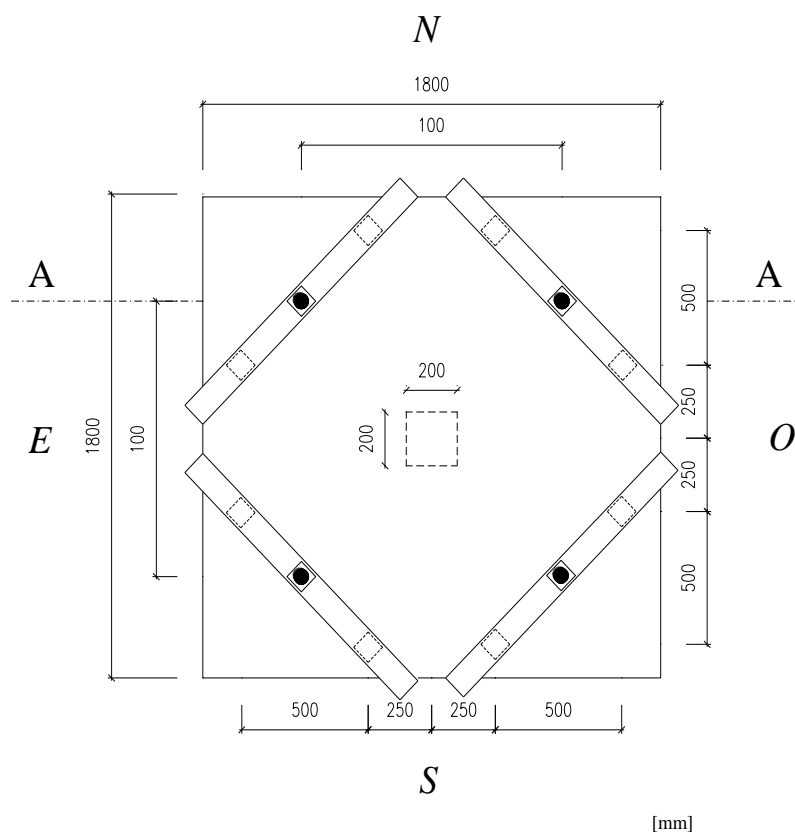


Figura 3.2 – Geometria dos modelos ensaiados.

As armaduras longitudinais de flexão, tanto superior como inferior, foram determinadas com a finalidade de se obter uma rotura por punçoamento, sendo a superior constituída por uma malha quadrada de $\varnothing 10//0.075$ m e a inferior por uma malha quadrada de $\varnothing 6//0.20$ m. A armadura superior com a maior altura útil é a orientada na direcção “N-S”, sendo o seu recobrimento de aproximadamente 20 mm na face superior e 10 mm na face inferior.

Nas figuras seguintes encontram-se os esquemas das armaduras usadas nos modelos.

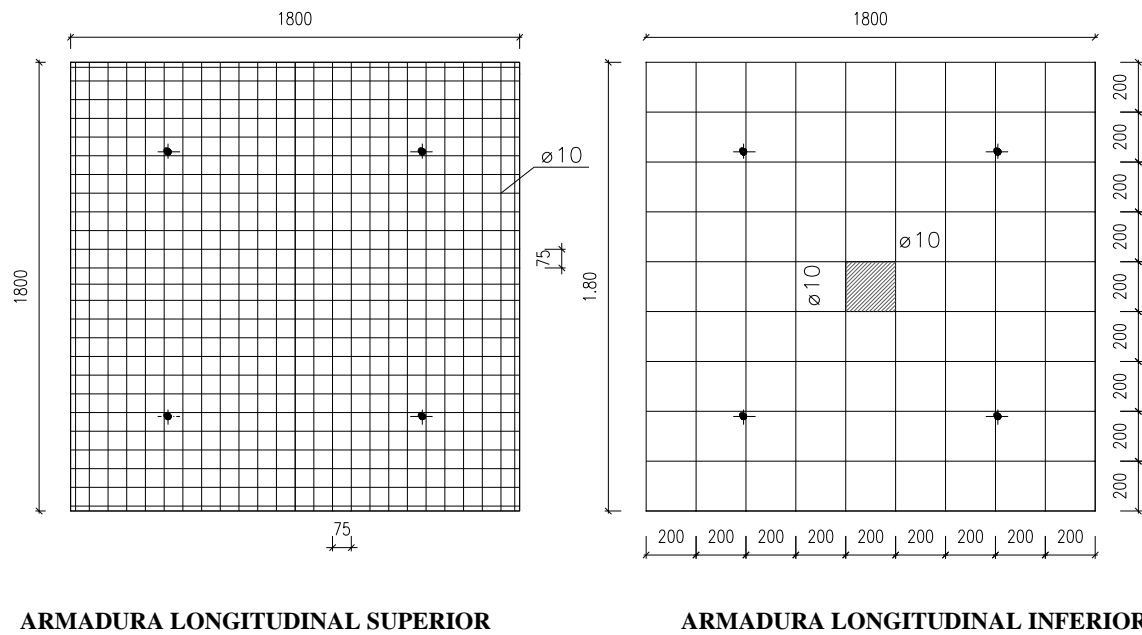


Figura 3.3 – Armadura longitudinal superior e inferior dos modelos.

Foi realizado um levantamento altimétrico das armaduras durante a execução dos modelos, tendo sido medidos os valores de altura útil (d), sendo apresentadas as alturas úteis médias no quadro seguinte.

Quadro 3.1 – Altura útil média dos modelos

Modelo	R	M6	M8	M6b	M8b
d (mm)	87.1	89.5	90.3	94.1	94.9



Figura 3.4 – Aspecto geral da armadura do modelo da laje antes e depois da betonagem.

3.3 CONDIÇÕES DE FRONTEIRA E CARREGAMENTO

De forma a simular as condições de fronteira cinemáticas, tendo em conta os bordos dos modelos de laje corresponderem a zonas de momentos nulos e o seu carregamento ser aplicado na zona central, utilizou-se o dispositivo representado na Figura 3.1 e Figura 3.2 apresentadas anteriormente. Este dispositivo corresponde à utilização de quatro perfis metálicos RHS, sob os quais estão instalados oito placas de aço com dimensões de $100 \times 100 \times 20 \text{ mm}^3$, que, em conjunto, servem de ancoragem a cordões de aço de alta resistência com diâmetro de 15.2 mm (0.6"). Estes cordões atravessam o modelo e são traccionados, à medida que a carga vai sendo aplicada no centro da laje, pelo macaco hidráulico. Desta forma são impedidos os deslocamentos verticais e libertas as rotações, permitindo assim aos bordos das lajes serem livres de rodar.

O pilar central é materializado por uma placa de aço 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 3.5 – Sistema de carregamento das lajes através de um macaco hidráulico.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Nesta secção apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de caracterização das propriedades mecânicas dos materiais utilizados em todos os modelos.

Foram ensaiados o betão, o aço da armadura longitudinal, os parafusos de reforço e as resinas da HILTI, materiais utilizados na realização dos ensaios.

3.4.1 Betão

Na caracterização do betão utilizado nos modelos experimentais, foram moldados provetes cúbicos com 150 mm de lado, tendo sido posteriormente ensaiados à compressão segundo a norma NP EN 12390 – 3 [24].

Para cada uma das lajes foram moldados 5 provetes, ensaiados no dia do ensaio do modelo respectivo. Na preparação e cura dos provetes foi seguido o recomendado nas normas NP EN 12390 – 1 e NP EN 12390 – 2 [22, 23].

No quadro seguinte, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios realizados.

Quadro 3.2 – Propriedades mecânicas do betão

Ligação	Modelo	f_{ccm} (MPa)	f_{cm} (MPa)	E_c (GPa)	Dias
-	R	49.2	39.3	28.9	65
Não Aderente	M6	59.6	47.7	30.8	99
	M8	59.7	47.7	30.8	99
Aderente	M6 b	45.9	36.7	28.2	395
	M8 b	47.1	37.7	28.4	407

Nota: f_{ccm} – tensão média de rotura à compressão do betão em provetes cúbicos; f_{cm} – tensão média de rotura à compressão do betão em provetes cilíndricos; E_c – módulo de elasticidade do betão.

Os valores de f_{ccm} foram determinados directamente através da média dos resultados dos ensaios de provetes cúbicos, tendo os restantes sido calculados através das seguintes expressões de correlação, nas quais o f_{ccm} e f_{cm} devem ser considerados em MPa:

$$f_{cm} = 0.8 f_{ccm} \quad (\text{com } f_{ccm} < 60 \text{ MPa}) \quad (3.1)$$

$$E_c = 8.482 \sqrt[3]{f_{cm}} \quad (\text{com } f_{cm} \text{ em MPa}) \quad (3.2)$$

No ensaio em compressão monotónica, foi usada a prensa hidráulica do LabDec conforme Figura 3.6. O ensaio foi realizado em condições normais de temperatura e humidade, com velocidade constante de 0.02 mm/s.



Figura 3.6 – Prensa de compressão e pormenor de rotura de um cubo de betão

3.4.2 Armadura Longitudinal

A armadura longitudinal foi caracterizada através de quatro provetes, por intermédio de ensaios de tracção de cada diâmetro utilizado como armadura longitudinal ($\varnothing 6$ e $\varnothing 10$). Aço esse correntemente designado por NR (laminado a quente e rugoso), para o qual se apresenta, no quadro seguinte, a sua tensão de cedência (f_{sy}) e tensão de rotura à tracção (f_{su}).

Os ensaios dos varões foram realizados obedecendo à norma NP EN10002 – 1 [21], sendo instrumentados com dois extensómetros diametralmente opostos, permitindo elaborar os gráficos apresentados que relacionam as tensões com as deformações.

Quadro 3.3 – Caracterização do aço da armadura longitudinal

Aço	f_{sy} (MPa)	f_{su} (MPa)
$\varnothing 6$	588	697
$\varnothing 10$	458	697

Nota: f_{sy} – tensão de cedência do aço; f_{su} – tensão de rotura do aço

Seguidamente, apresentam-se gráficos indicativos da evolução da tensão dos varões utilizados com a extensão ($\Delta L/L$), registado no decorrer dos ensaios.

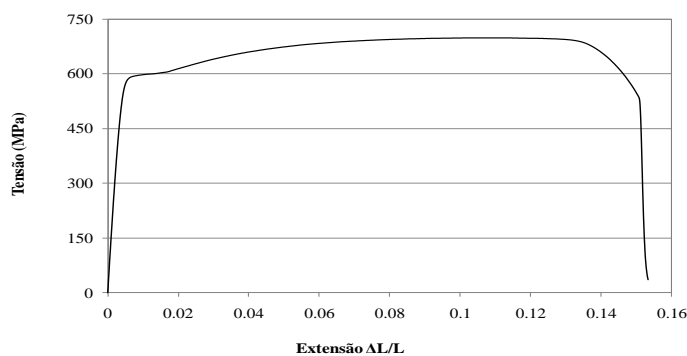


Figura 3.7 – Evolução da tensão com a extensão de um varão $\varnothing 6$

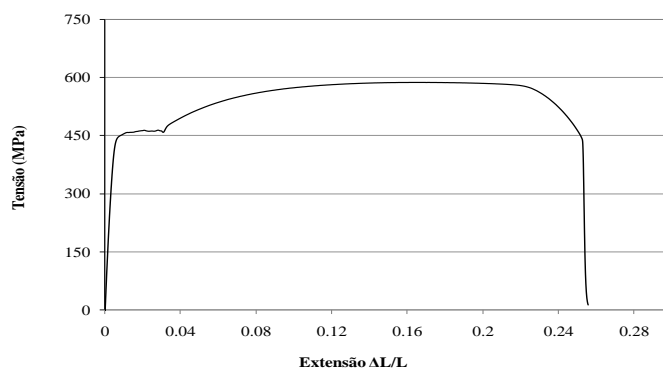


Figura 3.8 – Evolução da tensão com a extensão de um varão $\varnothing 10$

3.4.3 Parafusos de Reforço

Os parafusos utilizados como armadura de reforço transversal das lajes fungiformes foram obtidos a partir de varões roscados, apresentando uma diminuição da secção no centro para facilitar a colocação dos extensómetros, sendo S_0 a secção transversal dos parafusos na zona central sem rosca.

Para a caracterização do aço utilizado nos parafusos, submeteram-se quatro parafusos à tracção por cada diâmetro utilizado. Foram utilizados e ensaiados dois tipos diferentes de parafusos, cuja geometria em seguida se apresenta:

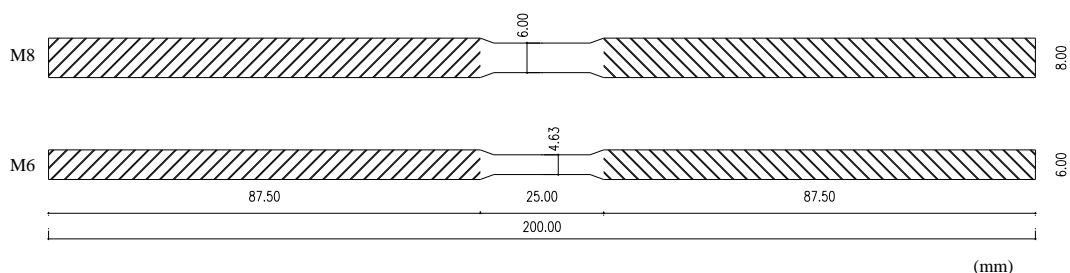


Figura 3.9 – Geometria dos parafusos utilizados nos ensaios.



Figura 3.10 – Ensaio à tracção de um parafuso de reforço e alguns parafusos utilizados no ensaio

Em seguida, apresentam-se os resultados dos ensaios realizados nos parafusos de reforço.

Quadro 3.4 – Caracterização do aço dos parafusos de reforço.

Parafuso	S_0 (mm ²)	$F_{P0.2}$ (kN)	F_u (kN)	$\sigma_{p0.2}$ (MPa)	σ_u (MPa)
M6	16.8	7	8.1	416	478
M8	28.3	14.8	17.1	523	603

Nota: S_0 – secção transversal dos parafusos na zona central sem rosca; $F_{P0.2}$ – força limite convencional de proporcionalidade a 0.2% média do aço dos parafusos; F_u – força de rotura à tracção média dos parafusos; $\sigma_{p0.2}$ – tensão limite convencional de proporcionalidade a 0.2% média do aço dos parafusos; σ_u – tensão de rotura à tracção média dos parafusos.

Nas figuras seguintes apresentam-se os gráficos indicativos da evolução da tensão dos parafusos utilizados com a extensão ($\Delta L/L$), registado no decorrer dos ensaios.

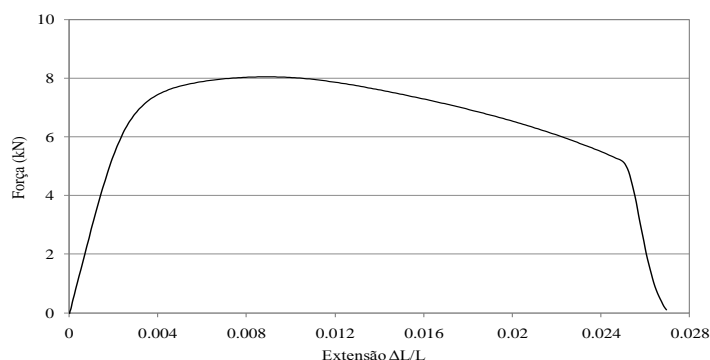


Figura 3.11 – Evolução da força de um parafuso M6 com a extensão

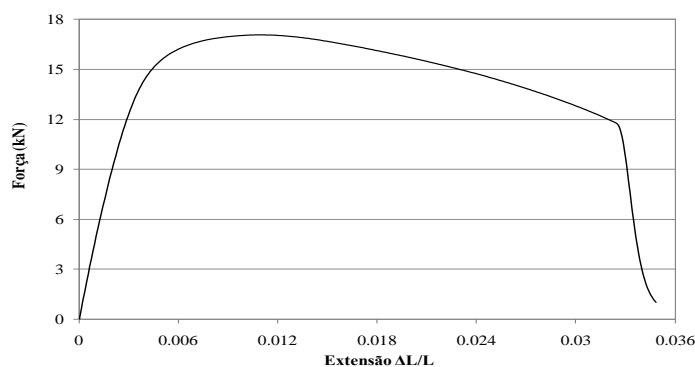


Figura 3.12 – Evolução da força de um parafuso M8 com a extensão

3.4.4 Agente de Aderência

Para a caracterização mecânica das resinas epoxídicas (HILTI HIT – RE 500) usadas no reforço dos modelos experimentais, prepararam-se seis provetes de controlo com dimensões $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$, tendo sido realizados ensaios para determinação da resistência e avaliação do comportamento à tracção por flexão, resistência à compressão monotónica e módulo de elasticidade segundo a Norma (T.-8. RILEM s.d.) [41, 42].

O ensaio à tracção por flexão foi realizado em condições normais de temperatura e humidade, utilizando uma prensa de compressão, elaborada pelo departamento de engenharia civil. O ensaio foi realizado com o controle de deslocamento, e segundo a Norma TC113 / CPT – PC – 5 (T.-P.-5. RILEM s.d.) [42].

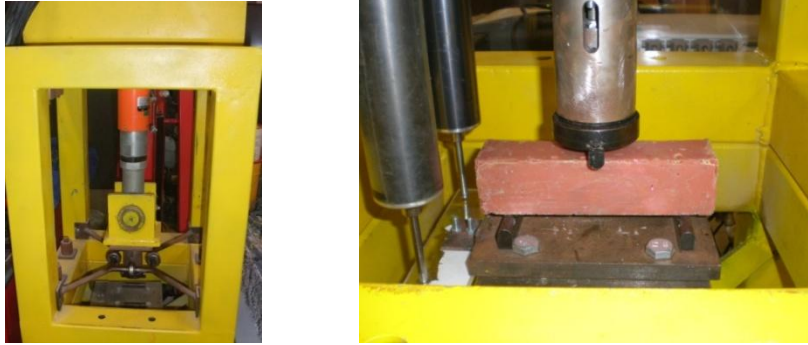


Figura 3.13 – Prensa de compressão LabDec e pormenor de rotura de um prisma de betão polimérico

Após a realização do ensaio, foram tratados os resultados e foi obtido o diagrama de tensão – deformação (Figura 3.14) para estes três provetes. No Quadro 3.5 indicam-se os valores de tensão de rotura à tracção por flexão ($f_{pct,u}$) e extensão última ($\epsilon_{pct,u}$) correspondente.

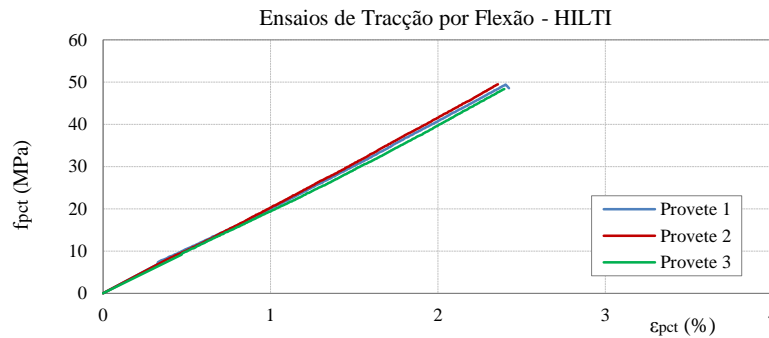


Figura 3.14 - Evolução da tensão de tracção com a extensão das resinas HILTI

Os valores de $f_{pct,u}$ e $\epsilon_{pct,u}$ foram determinados directamente através das seguintes expressões de correlação, nas quais o $f_{pct,u}$ e $\epsilon_{pct,u}$ devem ser considerados em MPa e em %, respectivamente :

$$f_{pct,u} = \frac{3}{2} \frac{Fl}{bh^2} \quad (\text{MPa}) \quad (3.3)$$

$$\epsilon_{pct,u} = 6 \frac{\delta h}{l^2} \quad (\%) \quad (3.4)$$

Quadro 3.5 - Tensão última de tracção por flexão e respectiva extensão das resinas HILTI

Provete	$f_{pct,u}$ (MPa)	$\epsilon_{pct,u}$ (%)	E (GPa)
1	48.9	2.38	2.06
2	48.9	2.33	2.10
3	47.8	2.37	2.02
Valores Médios	$f_{pct,m} = 48.5 \text{ MPa}$	$\epsilon_{pct,m} = 2.36 \%$	$E_m = 2.06 \text{ GPa}$

Nota: $f_{pct,u}$ - tensão de rotura à tracção por flexão; $\epsilon_{pct,u}$ - extensão correspondente à tensão de rotura à tracção por flexão; E - Módulo de Elasticidade

Após o ensaio à tracção por flexão, aproveitou-se uma das metades de cada provete para se ensaiar à compressão monotónica de acordo com a norma RILEM [41].

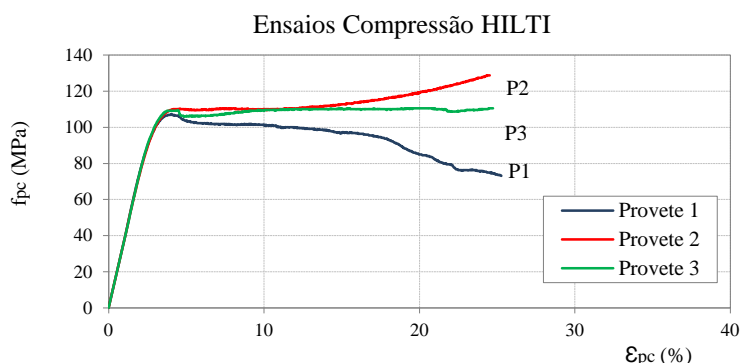


Figura 3.15 – Diagrama tensão-deformação dos ensaios de compressão monotónica

Na Figura 3.15 apresentam-se os diagramas tensão-deformação dos ensaios de compressão monotónica e no Quadro 3.6 indicam-se os valores para cada provete da tensão de rotura à compressão após rotura (f_{pc}), extensão na rotura (ϵ_{pc}), e o módulo de elasticidade (E).

Quadro 3.6 - Tensão de rotura à compressão e respectiva extensão das resinas HILTI

Provede	f_{pc} (MPa)	ϵ_{pc} (%)	E (GPa)
1	107.4	4.58	2.34
2	110.1	4.79	2.30
3	109.6	4.88	2.24
Valores Médios	$f_{pct,m} = 109.0$ MPa	$\epsilon_{pct,m} = 4.75$ %	$E_m = 2.29$ GPa

Nota: f_{pc} - tensão de rotura à compressão; ϵ_{pc} - extensão correspondente à tensão de rotura à compressão; E - módulo de Elasticidade

3.5 INSTRUMENTAÇÃO DOS ENSAIOS

Neste subcapítulo, serão descritos, de uma forma breve e sucinta, os principais tipos de instrumentos utilizados na realização dos ensaios que constam deste trabalho.

A instrumentação utilizada foi semelhante em todos os modelos de laje, e, teve por objectivo obter ao longo do ensaio o conjunto de valores da força e deslocamentos verticais no topo da laje e na zona do pilar, as extensões nas armaduras ordinárias e armaduras pré-esforçadas (parafusos de reforço).

Nos modelos ensaiados, a leitura de todas as grandezas instrumentadas foi realizada de forma contínua ao longo do ensaio.

Tal como foi referido, o ensaio consiste em sujeitar o modelo a uma carga vertical por intermédio de um macaco hidráulico, controlada por uma unidade de controlo de pressão hidráulica WALTER+BAIG, a qual permite medir a pressão instalada no circuito hidráulico.



Figura 3.16 – Unidade de controlo da pressão hidráulica usada nos ensaios.

Para quantificar a carga vertical aplicada no decorrer dos ensaios, foram instaladas quatro células de carga, uma por viga, sendo duas células do tipo KC-20M da TML e duas do tipo C6A da HBM, cuja localização espacial pode ser vista na Figura 3.2 e Figura 3.18.



Figura 3.17 – Célula de carga HBM (Esq.) e célula de carga TML (Dta), ambas de 200 kN.

Os deslocamentos verticais da laje foram medidos através de cinco deflectómetros eléctricos, de acordo com as duas próximas figuras.

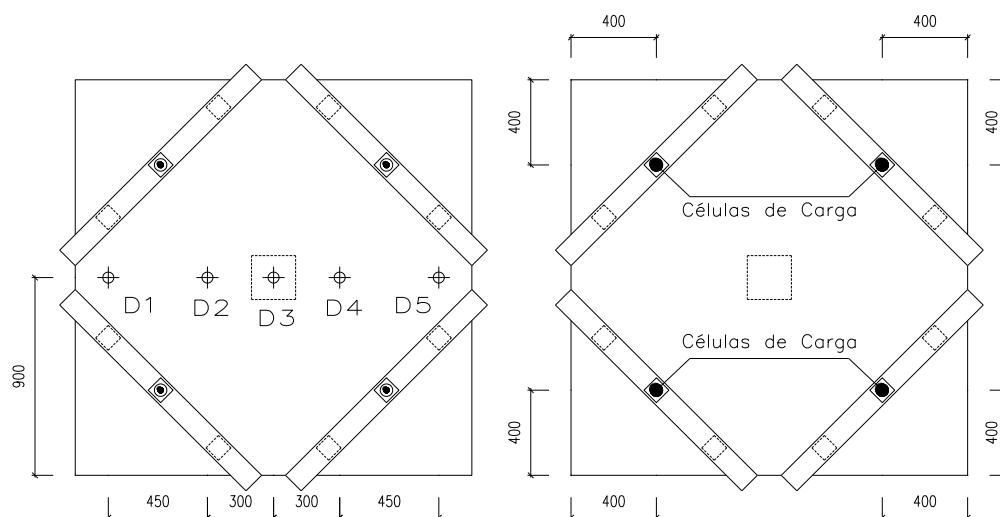


Figura 3.18 – Localização dos defletores e das células de carga verticais.



Figura 3.19 – Vista geral dos defletores (D1 a D5) apoiados no pórtico metálico.

Para quantificar as extensões das armaduras longitudinais superiores foram colados seis extensómetros eléctricos em três varões da armadura longitudinal superior com maior altura útil. Dois por vão, diametralmente opostos a meio vão do respectivo varão, localizados no centro do “pilar”, orientados no sentido “E-O”, conforme Figura 3.21. O espaçamento entre varões instrumentados é de 150 mm. Os extensómetros são do tipo FLA – 5 – 11 da TML.

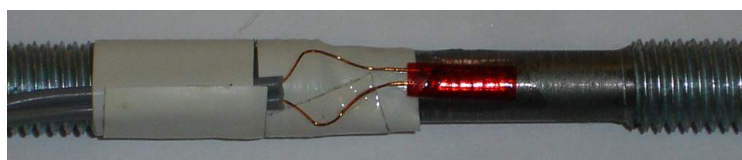


Figura 3.20 – Localização dos extensómetros nos parafusos de reforço.

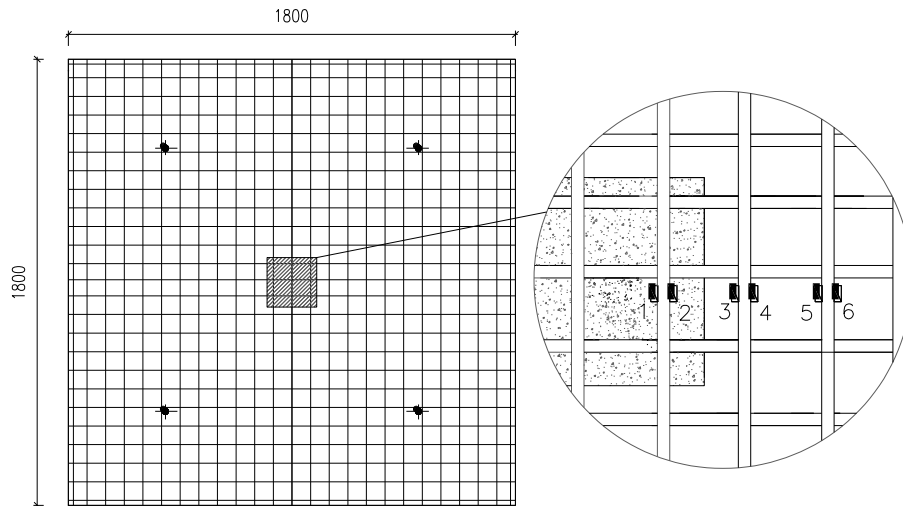


Figura 3.21 – Localização dos extensómetros colados à armadura longitudinal superior (Direcção “E-O”).

Na quantificação da evolução da extensão nos parafusos de reforço foram utilizados 16 extensómetros eléctricos, colados em 8 parafusos de reforço (Figura 3.22). Extensómetros esses, iguais aos utilizados na situação anterior e colados a meio dos parafusos roscados na sua zona lisa, como se pode observar na Figura 3.20.

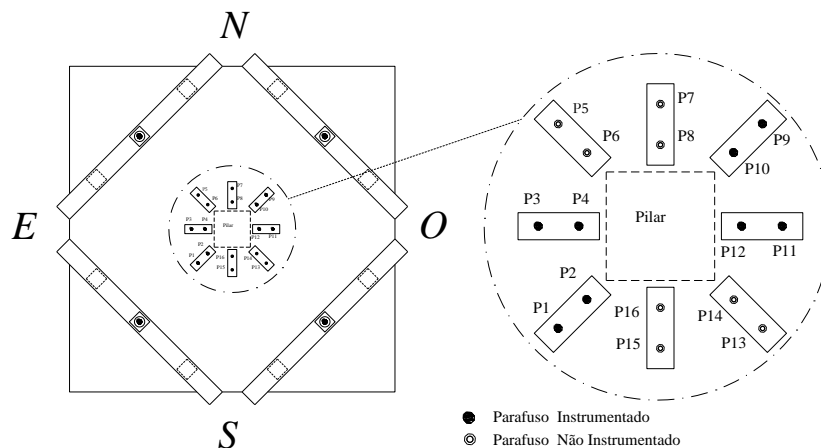


Figura 3.22 – Localização dos extensómetros nos parafusos de reforço.

Todos os instrumentos de medida atrás referidos foram ligados a quatro unidades de aquisição de dados em série “Data Logger HBM Spider 8”, como se pode observar na figura seguinte.



Figura 3.23 – Unidades de aquisição de dados “Data Logger HBM Spider 8” em série.

3.6 EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

Os modelos foram caracterizados e designados pelas letras R, M6, M6b, M8 e M8b. Correspondendo a letra R à laje utilizada como laje de referência, e as restantes designações ao tipo de reforço utilizado. Sendo M a designação adoptada para o tipo de carregamento, neste caso monotónico e, pelo facto de os parafusos de reforço usados terem essa mesma designação; os algarismos 6 e 8 referem-se ao diâmetro (diâmetros de 6 mm e 8 mm, respectivamente), que conjugados ou não com a letra b (bonding) se referem a um reforço aderente (b) ou não aderente, consoante a presença ou ausência do sufixo.

Pretende-se assim realizar um estudo de comparação entre soluções aderentes e não aderentes de reforços de lajes fungiformes por intermédio de armaduras transversais pré-esforçadas, já anteriormente referido.

O ensaio consiste em sujeitar o modelo a uma carga vertical por intermédio de um macaco hidráulico. Numa primeira fase, a carga será exercida até se atingir o estado limite de utilização, onde o modelo apresenta já um estado fendilhado. Por fim, depois de descarregado e sujeito a todos os processos de reforço, o modelo é submetido novamente a uma carga vertical até ser atingida a rotura do mesmo. Exceptua-se o ensaio do modelo de referência, que é realizado de uma forma contínua, sem reforço, até à rotura.

O critério de analogia praticado, não é mais do que o uso de um modelo de referência que, tal como o nome indica, servirá de base para a realização de um estudo comparativo entre modelos sujeitos a reforços aderentes e não aderentes, e a estes entre si.

Este critério foi tido em consideração em virtude de já existirem alguns dados relevantes em relação a técnicas de reforço e reparação de lajes fungiformes sujeitas a punçoamento por intermédio de parafusos transversais. Desta forma é possível seguir uma linha de raciocínio, onde já foi possível verificar a sua funcionalidade, tanto em ensaios monotónicos [6, 26, 36] como em ensaios cíclicos [26], mas apenas com reforço não aderente.

3.6.1 Modelo de Referência (R)

Este é o modelo não reforçado, que tal como o nome indica será usado como modelo de referência para comparação de resultados entre modelos reforçados. O modelo foi ensaiado aos 65 dias, sendo sujeito a um carregamento monotónico crescente, com uma velocidade constante.

A carga de rotura por punçoamento deu-se aos 269 kN, originando o aspecto de rotura superior conforme a figura seguinte.



Figura 3.24 – Vista superior do modelo R após rotura por punçoamento.

3.6.2 Modelos Reforçados

Todos os modelos reforçados foram sujeitos a duas fases distintas de ensaio, sendo que a primeira corresponde à fase de fendilhação e, a segunda, à fase de rotura.

Fase 1 (Fendilhação)

Todos os modelos, com excepção do modelo de referência, foram numa primeira fase sujeitos a um carregamento próximo de 60 % da carga de rotura por punçoamento do modelo de referência. Este carregamento foi realizado de uma forma contínua até ser atingido o valor pretendido, sendo então os modelos descarregados totalmente, até ficarem sujeitos somente ao peso próprio e restante carga permanente (material de apoio ao ensaio). Esta primeira fase de carregamento tinha por objectivo sujeitar os modelos a um nível de carga superior à carga de fendilhação, de forma a simular a situação de laje fendilhada e com necessidade de uma intervenção de reforço.

Mesmo não sujeitando a laje a tamanha deformação, poderia dar-se o caso de ser necessário realizar um reforço por alteração estrutural, sendo este tipo de técnica ainda válido, com a vantagem de não apresentar deformação residual devido a esse carregamento excessivo; ou seja, poderemos ter em conta, para a mesma situação, todos os resultados obtidos e apresentados seguidamente em virtude de a laje ser descarregada antes da fase de reforço.

No quadro seguinte indicam-se os valores das cargas verticais efectivamente aplicadas aos modelos nesta fase:

Quadro 3.7 – Carga aplicada na primeira fase (fendilhação).

Ligação	Modelo	Carga da 1ª Fase (kN)	carga última da laje R (%)
Não Aderente	M6	159.9	59
	M8	170.5	63
Aderente	M6b	153.0	57
	M8b	150.0	56

Fase 2 (Reparação e Reforço)

Esta é a fase onde se iniciam todos os processos de reparação e reforço dos modelos fendilhados. Será nesta fase que serão formados dois “grupos tipo” de reforço. Sendo a sua distinção realizada por intermédio de um sufixo b, que tal como já foi sobejamente mencionado, faz referência à diferença entre o pré-esforço ser aderente ou não aderente pela presença ou ausência de agentes de ligação nos orifícios criados na laje para acoplagem dos parafusos transversais pré-esforçados.

Foram tomadas algumas precauções no decorrer das operações de reforço, nomeadamente a parte de instrumentação, muito especialmente no manuseamento dos extensómetros existentes e na sua colocação posterior. Foram efectuados pequenos rasgos na laje de forma a os respectivos fios não serem esmagados ou cortados pelas chapas de aço que servem de ancoragem aos parafusos de reforço em ambas as zonas superior e inferior da laje.

Neste fase foram efectuados dezasseis furos verticais, com o auxílio de um berbequim, tendo sido mapeadas todas as armaduras longitudinais superiores de flexão da laje, na zona definida para a colocação dos parafusos. Pretendeu-se, assim, não danificar nenhum varão. Para a detecção das armaduras utilizou-se um Ferrosan PS 200 da Hilti. Foram utilizadas brocas superiores em 2 mm em relação ao diâmetro de parafuso usado no reforço, de forma a obter-se o espaço estritamente necessário para a colocação do parafuso, sem perda desnecessária de betão na zona envolvente de cada furo, e ainda assim permitir a passagem dos agentes de ligação (resina epoxídica).

Após a execução dos furos verticais, a laje foi sujeita a uma reparação na face inferior, condicionada nas lajes onde existia a necessidade de serem colocados elementos para posterior injeção de resina nos orifícios dos parafusos.

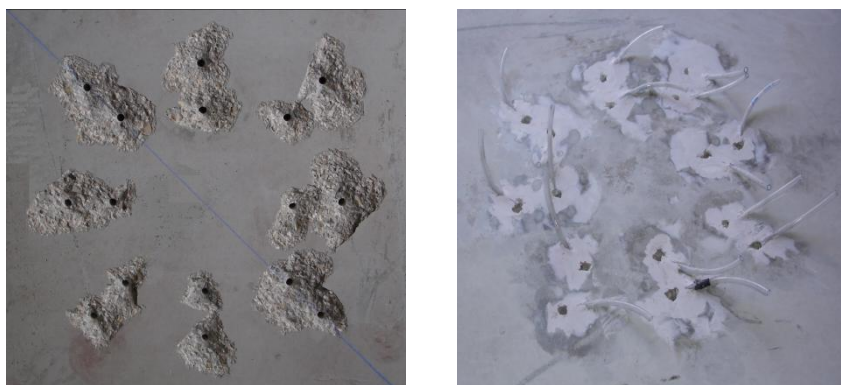


Figura 3.25 - Face inferior da laje antes e depois da colocação de tubos e reparação com argamassa.

Foi decidido colocar tubos de plástico. A escolha deste material teve como principais razões, o custo, o facto de ser leve e maneável, apresentar um comportamento elástico quando sujeito a compressões e torções, ser resistente, não oferecer resistência à passagem

da resina no seu interior, e ser fácil a colocação do bico da pistola de injeção da HILTI. Condições ideais para o tipo de objectivo pretendido.

Foram colocados 16 tubos de plástico que permitiram a livre circulação da resina ao longo do tubo, desde a injeção na parte inferior da laje até à zona superior dos parafusos, assim como um posicionamento tal que evitasse a destruição de mais betão. Desta forma, foi aproveitada ao máximo a zona de destaque de betão, tendo sido definida uma posição que permitisse a rápida, fácil e acessível colocação da resina, sendo o comprimento dos tubos de cerca de 300 mm aproximadamente. Este comprimento foi considerado o “ideal”, não só por tornar fácil e acessível a colocação do bico da pistola, mas também por se ter de puxar e segurar o mesmo aquando da colocação do bico da pistola dentro do tubo, evitando assim uma rotura na zona de ligação à laje por esforços colaterais exercidos no tubo.

A fixação dos tubos e reparação do betão consistiu na aplicação de uma argamassa de reparação “MASTERFLOW 928 da BETTOR”.

Após a reparação da laje, foram colocados dezasseis parafusos de reforço em duas camadas em volta do pilar, como mostra a Figura 3.26. A primeira camada encontrava-se a 0.5d do pilar e a segunda a 0.75d da primeira. O mapa de localização dos parafusos pode ser observado por intermédio da figura seguinte.

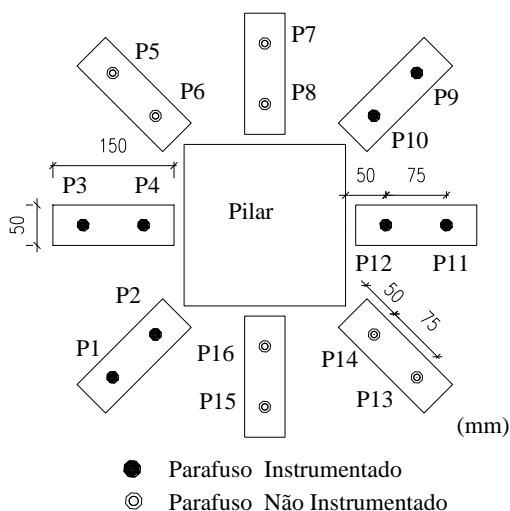


Figura 3.26 – Mapa de localização dos parafusos de reforço.

Nos modelos M6 e M6b foram utilizados parafusos obtidos a partir de barras roscadas de 6 mm de diâmetro. Nos modelos M8 e M8b, os parafusos de reforço foram obtidos de barras roscadas de 8 mm de diâmetro. A secção média dos parafusos M6 e M8, tinham uma zona lisa e uniforme, com um diâmetro de 4.6 mm e 6.0 mm, respectivamente.

Foram ainda colocadas placas de aço com 150 x 50 x 5 mm³ em ambas as faces (faces superior e inferior) de forma a ancorar os parafusos (Figura 3.27 e Figura 3.28) e transmitir as forças dos parafusos ao betão.

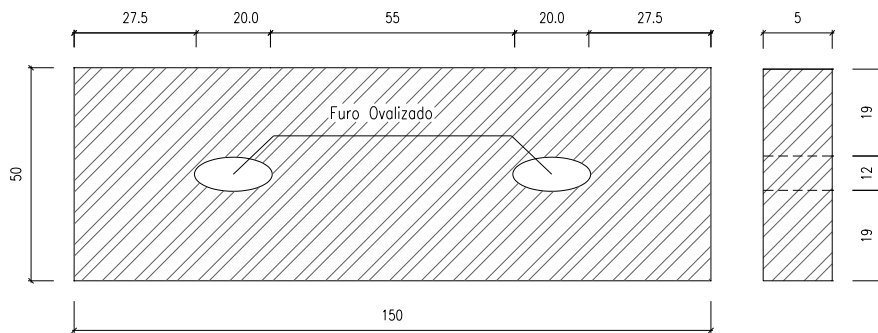


Figura 3.27 – Geometria das chapas de ancoragem dos parafusos (mm)

Os parafusos, depois de colocados com as respectivas chapas, foram então pré-tensionados com uma pré-carga inicial por parafuso, sendo a sua posição igual em todos os modelos, variando-se apenas o diâmetro dos parafusos e o pré-esforço aplicado a estes, sendo o pré-esforço aplicado através de uma chave “dinamómetro”.



Figura 3.28 – Aspecto geral do reforço ao punçamento com parafusos de um dos modelos, antes da aplicação da resina – Vista Superior e Inferior.

Todo o sistema de injeção foi dimensionado para a inexistência e permanência de ar no espaço envolvente entre a laje e os parafusos de reforço. Esta situação foi totalmente concretizada pela libertação do mesmo na zona superior. Desta forma garantimos que a ligação apenas será preenchida com resina.



Figura 3.29 – Aspecto geral do reforço ao punçoamento com parafusos de um dos modelos, durante a aplicação da resina – Vista Superior e Inferior.

As cargas de rotura, para os ensaios monotónicos aderentes e não aderentes são apresentadas no Quadro 3.8:

Quadro 3.8 – Cargas de rotura experimental (kN)

Modelo	R	M6	M8	M6b	M8b
V _{exp}	269	331	380	374	365

Nota: V_{exp} – carga de rotura experimental (kN)

3.7 ANÁLISE DE RESULTADOS

3.7.1 Extensões na Armadura Longitudinal Superior

Neste ponto será feita uma análise, maioritariamente gráfica, da evolução das extensões na armadura longitudinal superior com maior altura útil (direcção “N-S”) em função da carga vertical aplicada. Na construção dos gráficos considerou-se a média das extensões obtidas no par de extensómetros dos três varões instrumentados. A título de exemplo, a consideração do par Ext.1 + Ext.2, refere-se à média das extensões obtidas entre o Extensómetro 1 e o Extensómetro 2.

A análise de tensões nos varões instrumentados longitudinalmente será também realizada na direcção “E-O” para alguns patamares de carga, sendo apresentados gráficos de

extensões dos varões longitudinais em função das suas respectivas coordenadas ao longo do alinhamento “E-O”.

Tendo em consideração o valor do peso próprio da laje e todo o equipamento de apoio e de instrumentação colocado sobre a mesma, é de realçar que o carregamento inicial em todos os gráficos é de 12.23 kN.

Para a análise quantitativa dos resultados, foi necessário calcular a extensão de cedência do aço nas armaduras longitudinais superiores (ϵ_{sy}):

$$\epsilon_{sy} = \frac{f_{sy}}{E_s} \approx \frac{458}{190000} \approx 2.4\% \quad (3.5)$$

Onde,

- f_{sy} tensão de cedência do aço , caracterizada nos ensaios dos materiais;
- E_s módulo de elasticidade do aço (190 GPa).

3.7.1.1 Modelo R (Referência)

Duma maneira geral, as extensões aumentam com o incremento de carga vertical. Visualizando os gráficos, referentes à extensão em função da carga vertical, que se apresenta seguidamente, podemos constatar e identificar dois declives distintos. Um primeiro, praticamente linear até uma carga máxima de 55 kN, verificando-se aí o ponto de viragem marcado pela mudança de declive, onde a inclinação do segmento da relação carga-extensão baixa substancialmente devido à perda de rigidez associada ao início da fendilhação do modelo. Somente o varão sob o pilar, instrumentado com o par de extensómetros 1+2, apresenta uma extensão ligeiramente superior a 2.4 ‰. Os restantes não chegam a atingir a extensão de cedência. Esta situação de cedência da armadura sob o pilar, já era uma situação esperada, não só por ser a zona de maiores momentos flectores, como por a escolha das armaduras ordinárias ter sido pensada para esse facto, como foi referido no início do capítulo, na parte de caracterização de materiais.

Na Figura 3.31 são representadas as distribuições transversais de extensões para vários patamares de carga. A evolução da extensão é monotonicamente crescente com a carga vertical aplicada, registando-se os valores máximos de extensão sobre o pilar.

Mais uma vez se comprova a interdependência entre o aumento de carga vertical e a existência de maiores tensões sobre o pilar, o que origina as maiores extensões, quer numa direcção quer noutra. Por outro lado, é notória a diminuição das mesmas no seu afastamento em relação ao pico (zona de Pilar), devido à diminuição de esforços na laje entre o pilar e os bordos (zona de momentos nulos).

Modelo R – Varões na direcção “N-S”

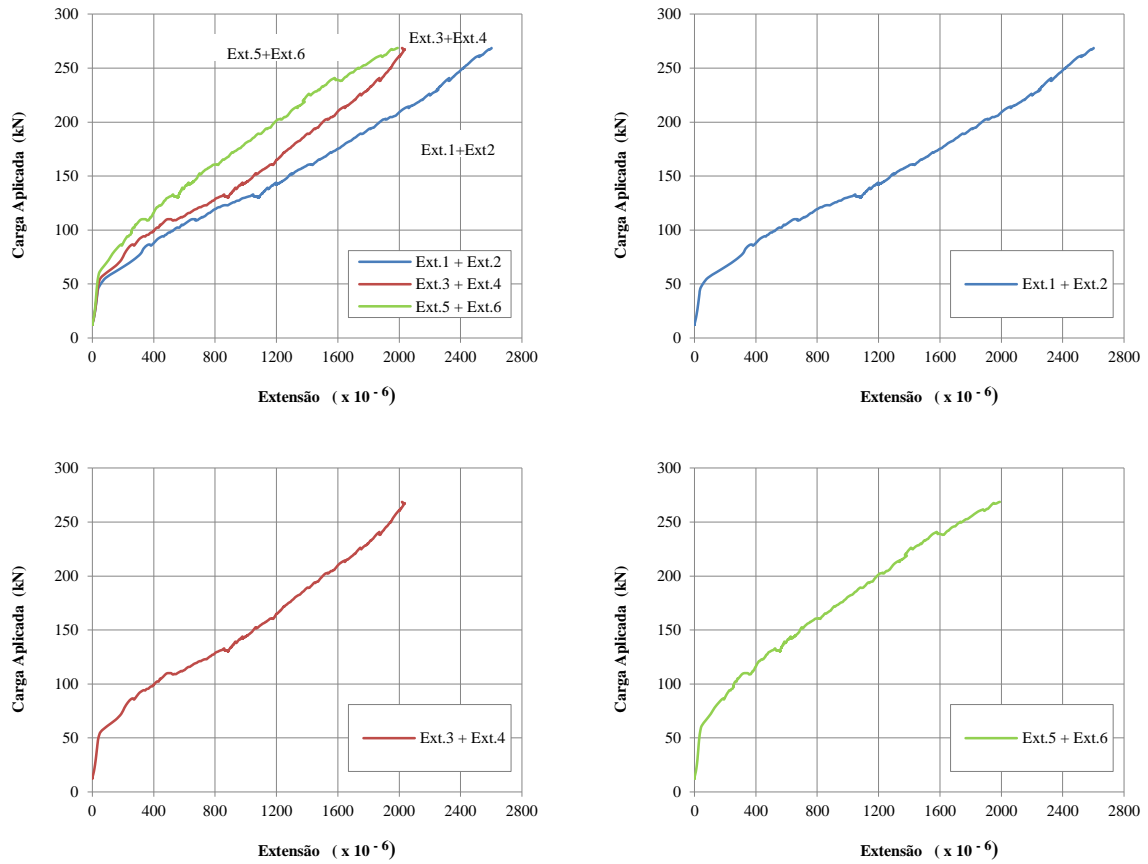


Figura 3.30 – Evolução das extensões na armadura longitudinal superior no modelo R (varões na direcção “N-S”)

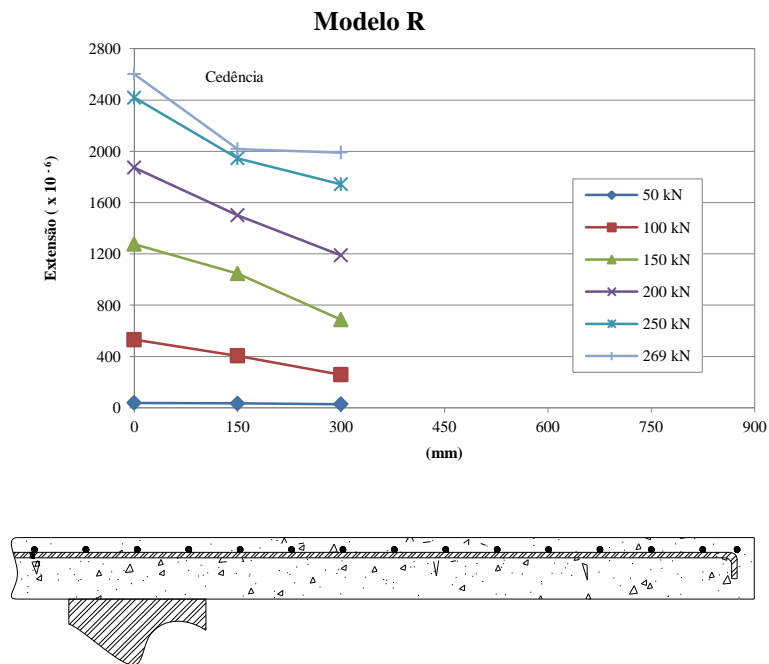


Figura 3.31 – Distribuição transversal das Extensões na armadura longitudinal Superior no Modelo R

3.7.1.2 Modelos M6 e M6b

Modelos M6 e M6b (Fase 1 – Fendilhação)

Relativamente a esta fase, a de fendilhação, identificam-se dois declives distintos na curva carga-extensão (Figura 3.32) para ambos os ensaios monotónicos. Para o modelo M6 o início da fendilhação, e consequente perda de rigidez, ocorre para uma carga de cerca de 25 kN. No modelo M6b tem início nos 40 kN, aproximadamente. Em ambos os modelos, não se verifica a entrada em cedência de nenhum dos varões instrumentados da armadura longitudinal superior nesta fase. No entanto, é notório uma maior extensão residual pós-descarga no modelo M6b em relação ao modelo M6, isto, apesar de nesta fase todas as extensões máximas serem atingidas no modelo M6, com excepção do varão mais próximo do pilar no modelo M6b instrumentado pelo par de extensómetros Ext.1 + Ext.2 (Figura 3.32 e Figura 3.33).

A distribuição transversal, nos dois modelos em questão, é igualmente a espectável, com os valores máximos das extensões a registarem-se sobre o pilar.

Modelos M6 e M6b - varões na direcção “N-S”

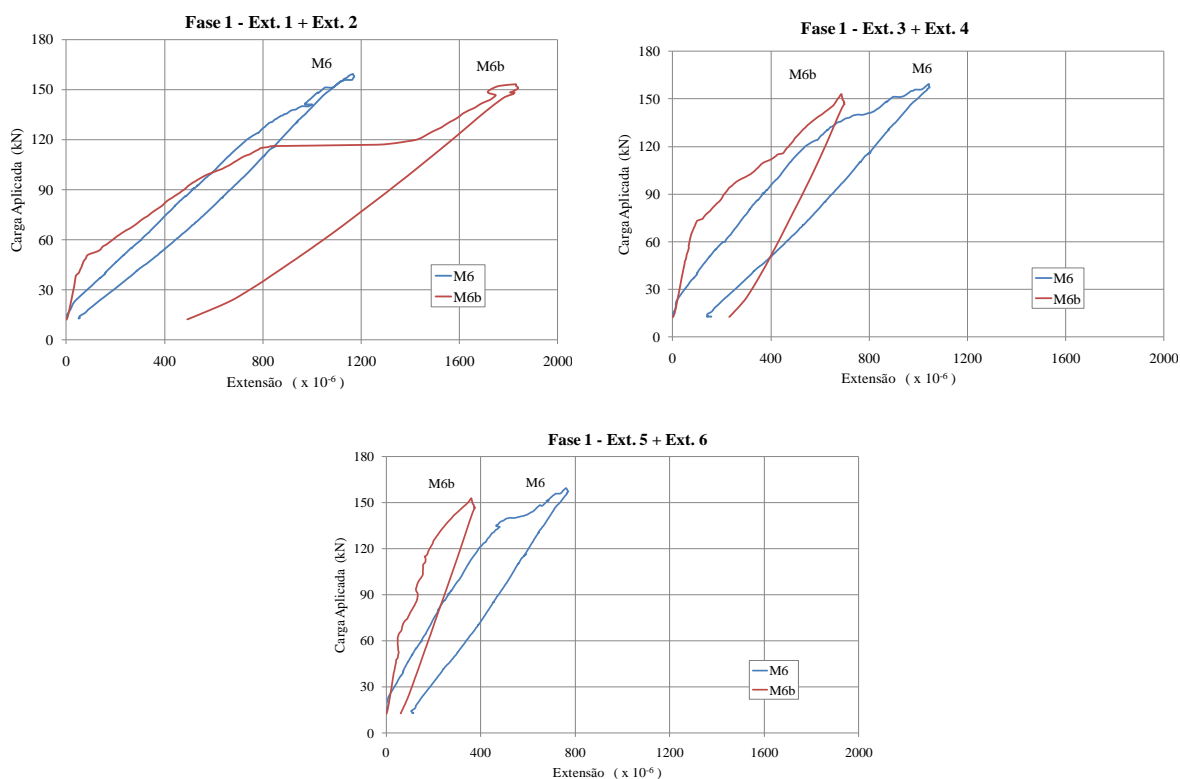


Figura 3.32 – Evolução das extensões na armadura longitudinal superior nos modelos M6 e M6b – Fase 1

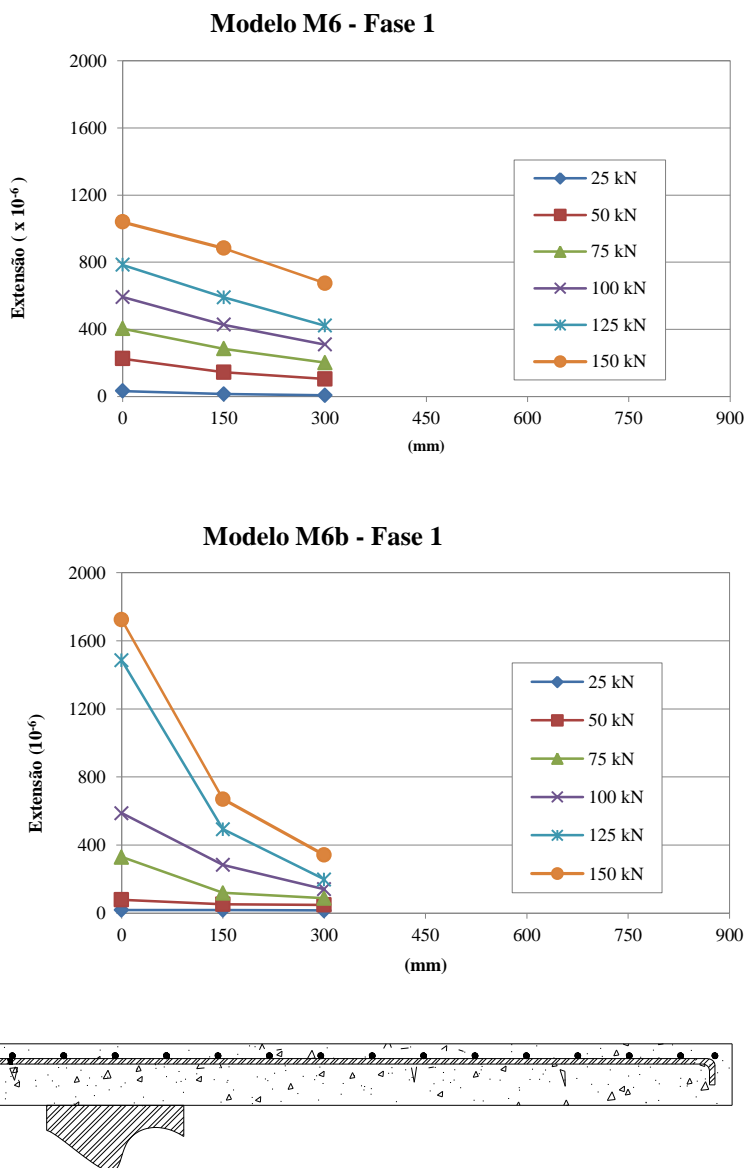


Figura 3.33 – Distribuição transversal das extensões na armadura longitudinal superior nos modelos M6 e M6b – Fase 1

Modelos M6 e M6b (Fase 2 – Rotura)

Esta fase engloba em todos os modelos a sua fase antecedente, dado existirem danos residuais nos materiais dela resultante.

Em todos os modelos, as extensões variam de forma sensivelmente linear com o incremento da carga vertical, não se verificando um comportamento típico de entrada em cedência de nenhum dos varões, apesar de as extensões em alguns varões terem excedido o valor de 2.4 ‰. No entanto, é possível constatar que tal como na primeira fase, as extensões máximas são atingidas no modelo M6b (com aditivo de ligação, vulgo resinas) no varão mais próximo do pilar instrumentado pelo par de extensómetros Ext.1+ Ext.2.

Modelos M6 e M6b - varões na direcção “N-S”

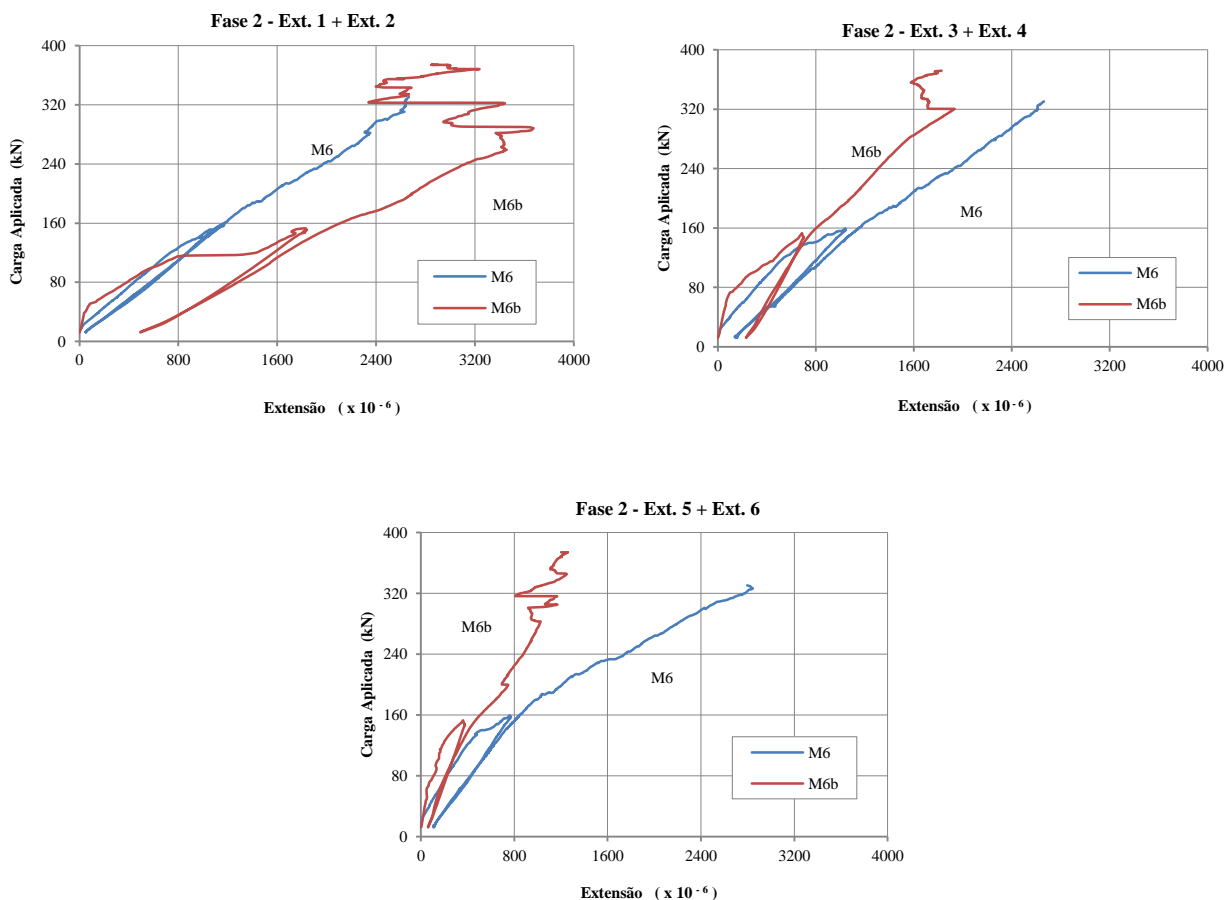


Figura 3.34 – Evolução das extensões na armadura longitudinal superior nos modelos M6 e M6b – Fase 2

Em todos os modelos e respectivos varões instrumentados, verificam-se ligeiras perturbações nas leituras dos extensómetros na fase final de carregamento, motivadas por uma possível descompressão dos varões, originada pela forte fendilhação que já se faz sentir.

As extensões verificadas nos varões mais afastados do pilar são francamente inferiores no modelo aderente (M6b) em relação ao modelo sem os respectivos aditivos (M6).

Apesar das extensões verificadas nos dois varões instrumentados mais afastados do pilar, constata-se que no modelo M6b elas são inferiores em termos de grandeza em relação ao modelo homólogo, estas são atingidas para um valor de carga bastante superior. A influência da “resina” caracteriza-se nos modelos com parafusos M6 pela variação de extensões nas armaduras longitudinais, sendo este fenómeno bem visível em todas as figuras.

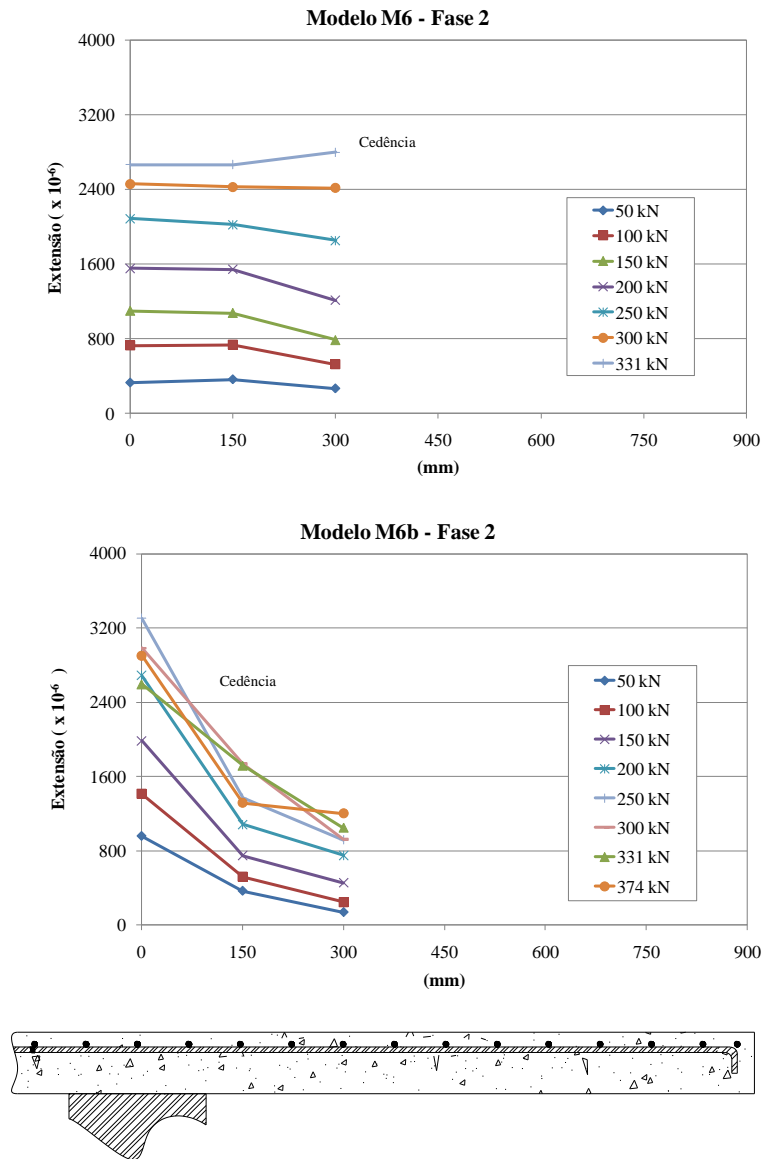
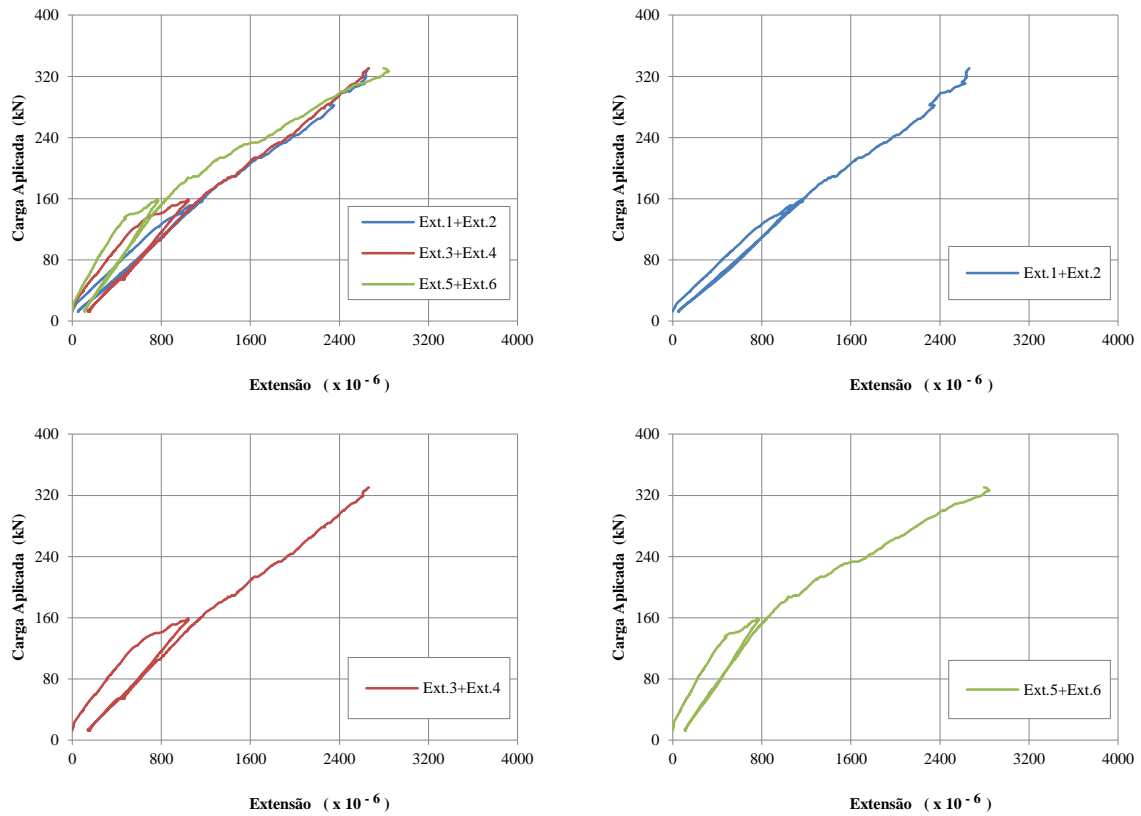


Figura 3.35 – Distribuição transversal das extensões na armadura longitudinal superior nos modelos M6 e M6b – Fase 2

Mais uma vez se comprova a interdependência entre o aumento de carga vertical e a existência de maiores tensões sobre o pilar, o que origina as maiores extensões, quer numa direcção quer noutra. Por outro lado, é notória a diminuição das mesmas no seu afastamento em relação ao pico (zona de Pilar), devido à diminuição de esforços na laje entre o pilar e os bordos (zona de momentos nulos), ou seja, verifica-se um menor campo de tensões.

Como nota de referência, o Ext.6 do modelo M6b ficou danificado no decorrer do ensaio, pelo que foi excluído do par Ext.5 + Ext.6, apesar de continuar a ter essa designação para efeitos de comparação, contabilizando-se apenas o valor do Ext.5.

Modelo M6 – Varões na direcção “N-S”



Modelo M6b – Varões na direcção “N-S”

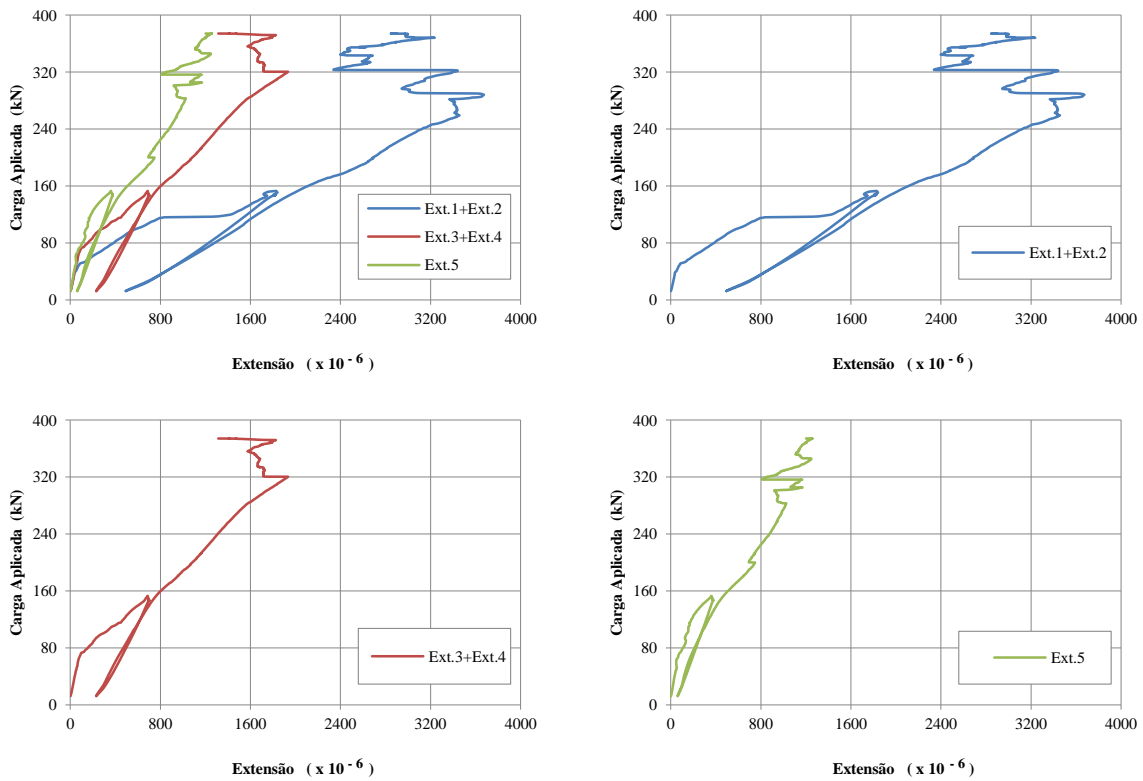


Figura 3.36 – Evolução Global das extensões na armadura longitudinal superior nos modelos M6 e M6b

3.7.1.3 Modelos M8 e M8b

Modelos M8 e M8b – Fase 1 (Fendilhação)

Nesta fase de fendilhação, e, de uma maneira geral, verificam-se em todos os modelos dois declives distintos da evolução da extensão com a carga vertical, variando apenas os valores do início da fendilhação dos modelos, como é visível na Figura 3.37.

Os valores de início de fendilhação são em tudo idênticos aos verificados para os modelos M6 e M6b nesta mesma fase, sendo neste caso de 55 kN para o modelo M8 e de 60 kN para o modelo M8b.

Em ambos os modelos, não se verifica a entrada em cedência de nenhum dos varões instrumentados da armadura longitudinal superior. Comparativamente aos modelos anteriormente descritos, verificamos um comportamento semelhante e com valores esperados, no geral, com os valores máximos das extensões registaram-se no varão mais próximo do pilar. Este facto já era esperado, tendo em conta que foram executados e moldados da mesma forma e com os “mesmos” materiais relativos a cada grupo de lajes (M e M b).

Modelos M8 e M8b - varões na direcção “N-S”

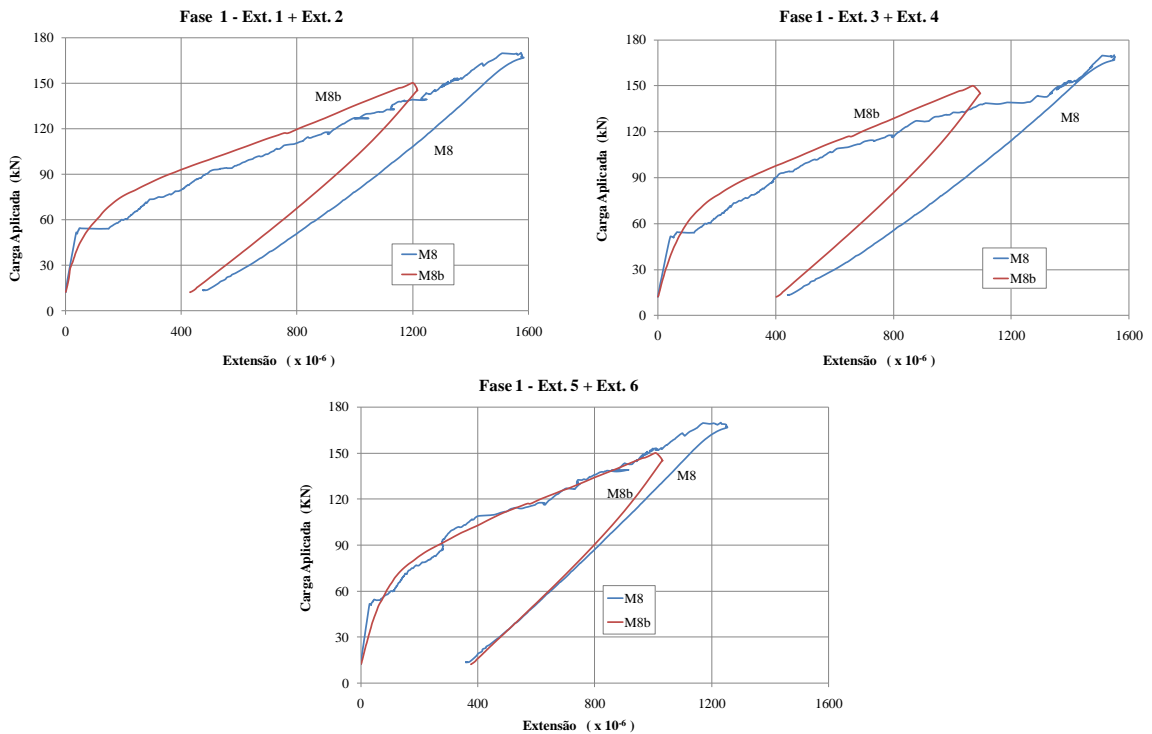


Figura 3.37 – Evolução das extensões na armadura longitudinal superior nos modelos M8 e M8b – Fase 1

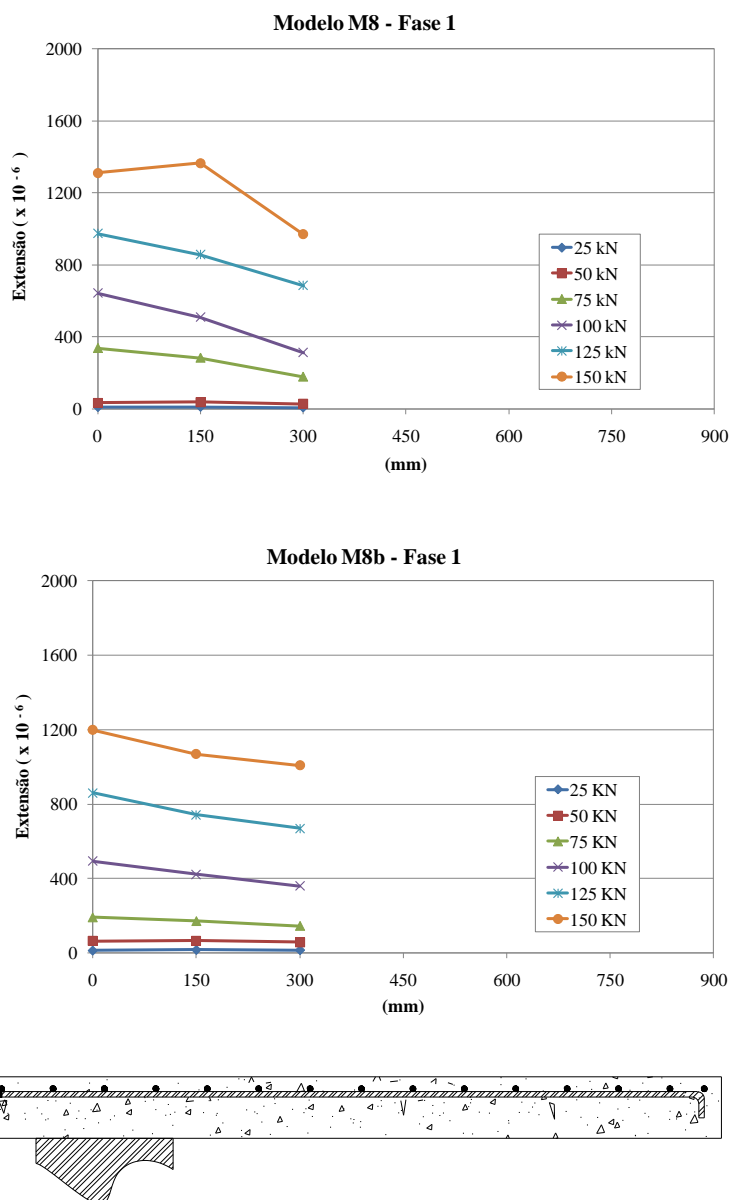


Figura 3.38 – Distribuição transversal das extensões na armadura longitudinal superior nos modelos M8 e M8b – Fase 1

Modelos M8 e M8b (Fase 2 – Rotura)

Esta fase engloba, em todos os modelos, a sua fase antecedente, pela mesma razão referida anteriormente.

Nos patamares iniciais de carregamento, pós-reforço e reparação da laje, as extensões em todos os modelos variam de forma sensivelmente linear com a carga vertical, nos patamares iniciais do carregamento.

No modelo M8, os varões instrumentados apresentam um comportamento típico de entrada em cedência, com grandes variações de extensão para pequenos incrementos de carga superiores a 300 kN.

No modelo M8b não se verifica um comportamento típico de entrada em cedência de nenhum dos varões instrumentados, sendo notório a existência de patamares de descompressão para cargas aplicadas superiores a 250 kN. Estas irregularidades poderão ser originadas pela forte fendilhação presente no modelo para este nível de carregamento. Para carregamentos acima dos 300 kN, verificam-se valores de extensão aproximados entre as armaduras longitudinais afastadas de 150 mm e 300 mm do pilar. Esta situação deve-se, principalmente, à forte fendilhação existente.

Modelos M8 e M8b - varões na direcção “N-S”

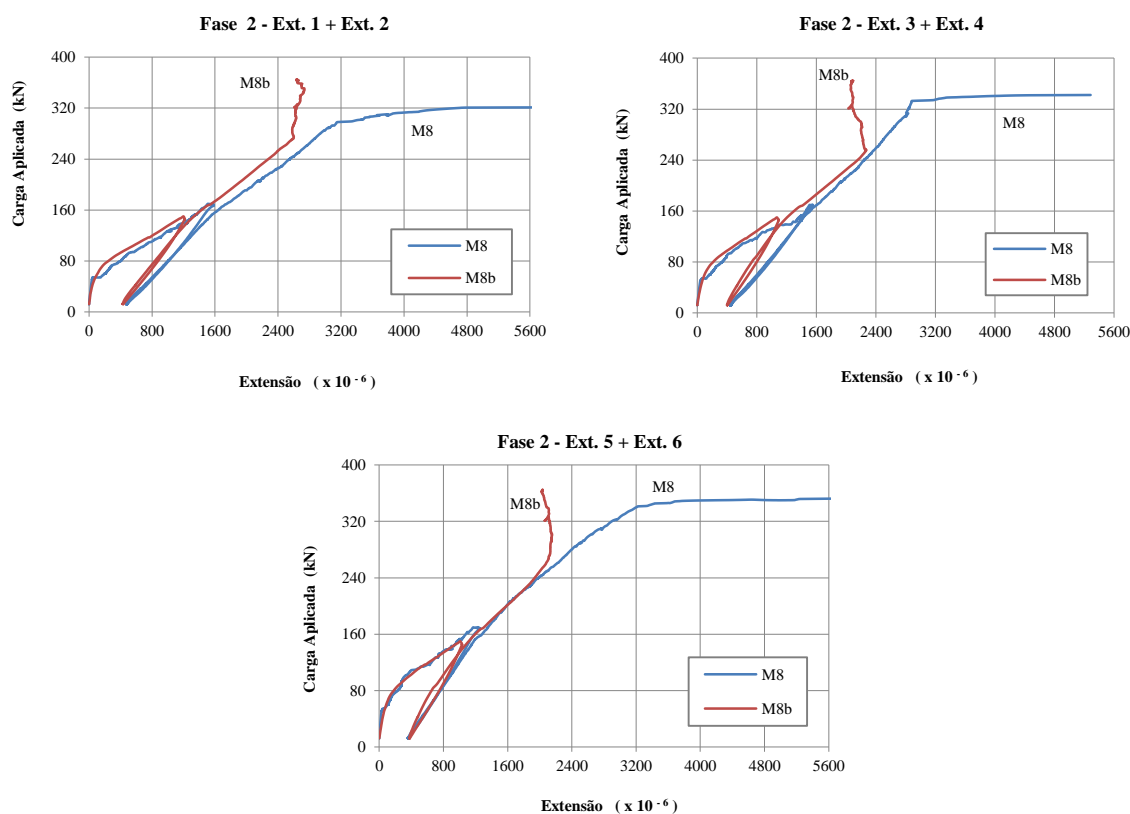


Figura 3.39 – Evolução das extensões na armadura longitudinal superior nos modelos M8 e M8b – Fase 2 (varões na direcção “N-S”)

Transversalmente, verificamos um comportamento idêntico entre os modelos, existindo um campo de tensões em torno do pilar, mas de valores superiores no modelo não aderente. Na fase final de carregamento verificam-se algumas variações no valor das extensões provocadas pela grande fendilhação existente.

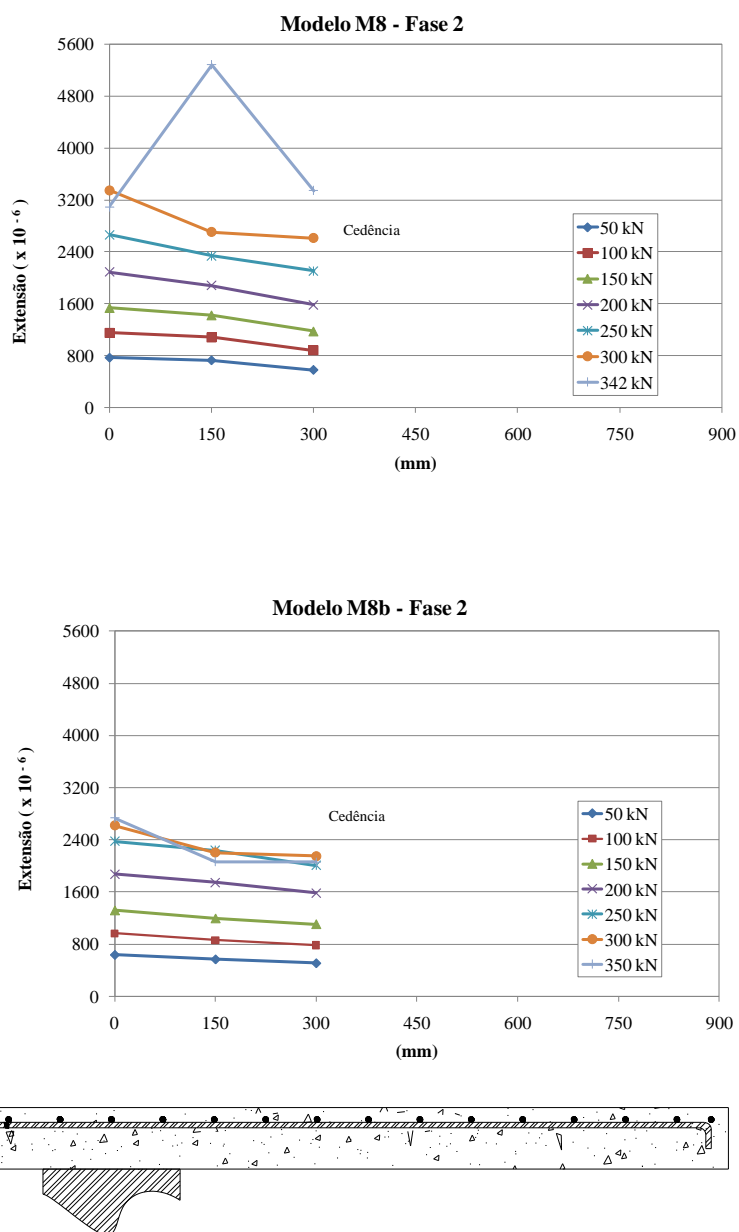
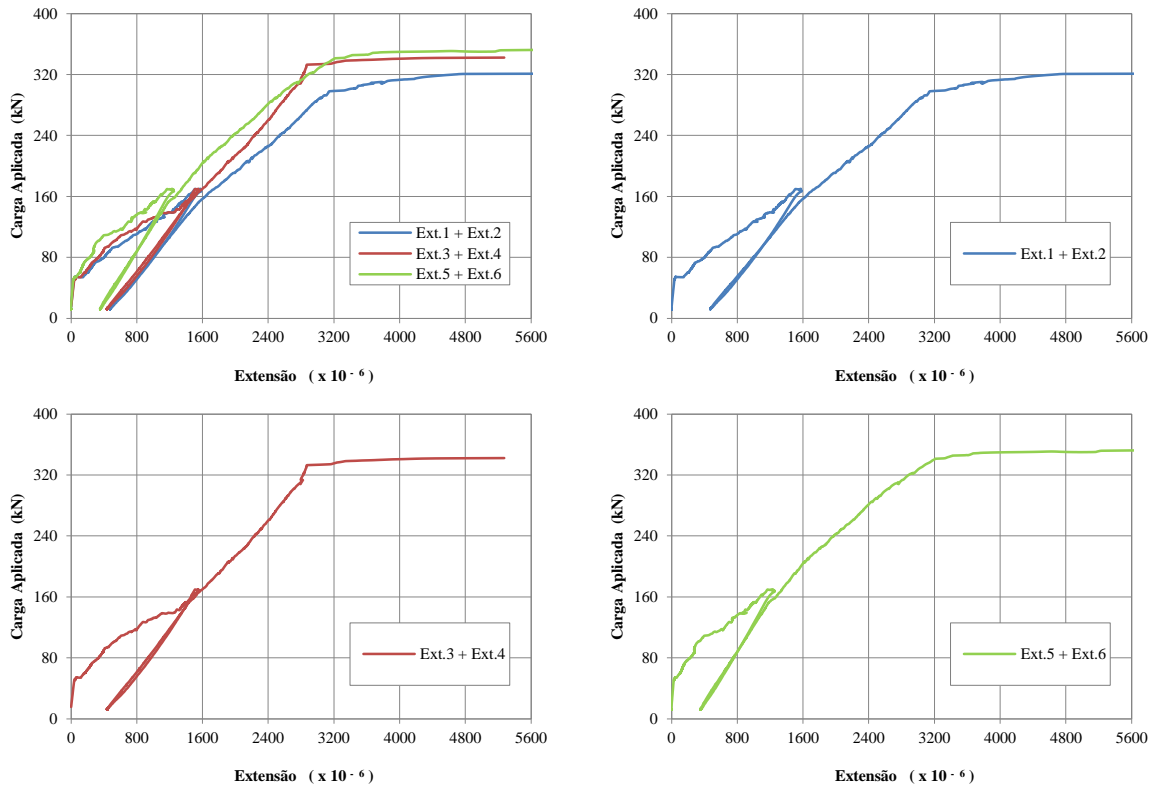


Figura 3.40 – Distribuição transversal das extensões na armadura longitudinal superior nos modelos M8 e M8b–Fase 2

Em termos globais, a influência da resina epoxídica provoca uma redução de extensão nas armaduras longitudinais, não se verificando a sua entrada em cedência.

Como nota de referência, o Ext.2 e Ext.6 do modelo M8b ficaram danificados no decorrer do ensaio, pelo que foram excluídos dos pares Ext.1+Ext.2 e Ext.5+Ext.6, apesar de continuarem a ter essa designação para efeitos de comparação, contabilizando-se apenas o valor do Ext.1 e Ext.5 dos pares respectivos.

Modelos M8 - varões na direcção “N-S”



Modelo M8b - varões na direcção “N-S”

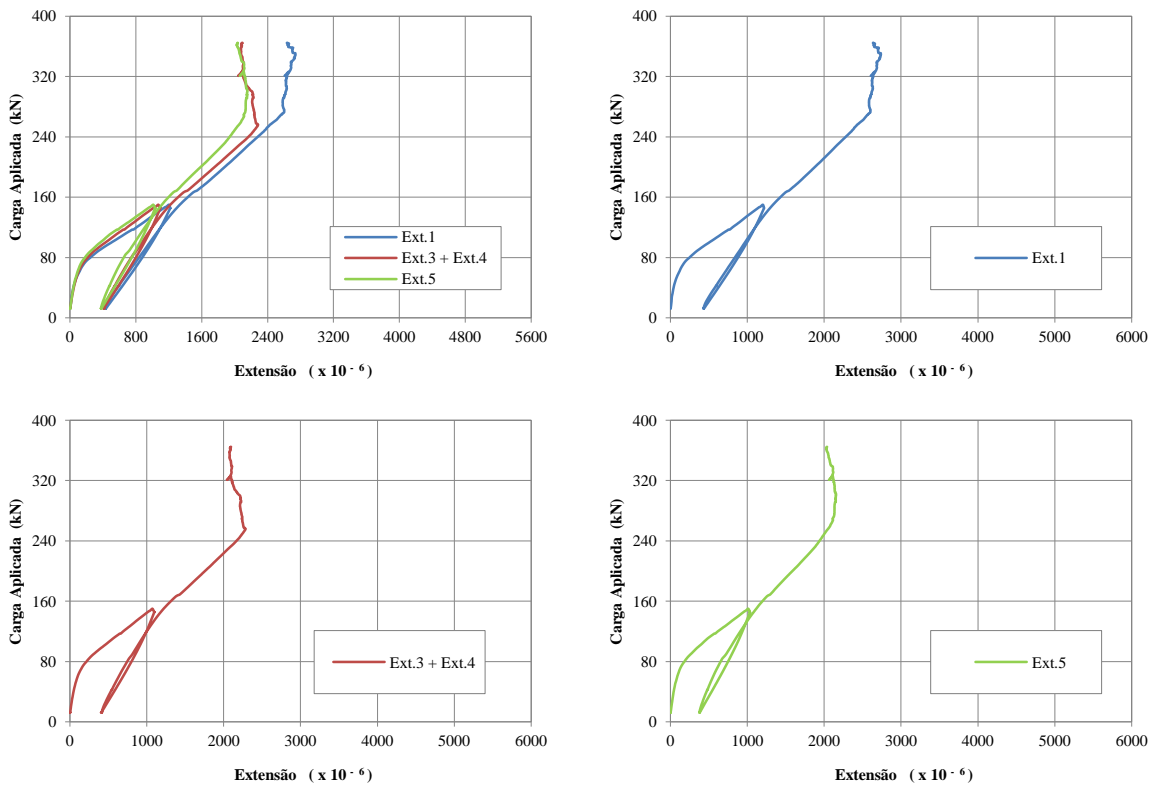


Figura 3.41 – Evolução Global das extensões na armadura longitudinal superior nos modelos M8 e M8b (varões na direcção “N- S”)

3.7.1.4 Observações gerais

Em geral, e para os patamares de carga apresentados, a distribuição transversal de extensões apresenta valores máximos sobre o pilar, assim como para a mesma carga vertical aplicada se verificam menores extensões nas armaduras longitudinais dos modelos com reforço aderente em relação aos não aderente.

À medida que a carga se aproxima da carga de rotura, verificam-se em alguns modelos perturbações na evolução das extensões, na armadura longitudinal superior. Esta situação é bastante mais notória, nos varões dos modelos aderentes (M6b e M8b) onde são visíveis vários patamares de descompressões nos varões longitudinais e uma linearidade entre grandezas de extensões para os varões mais afastados do pilar.

Nos modelos não aderentes, os varões mais afastados do pilar apresentam um comportamento monotónico em que as extensões aumentam à medida que se aumenta a carga vertical, sem aparentemente serem tão afectados pela fendilhação.

O quadro seguinte apresenta as extensões médias obtidas nos varões da armadura longitudinal superior, instrumentados para três patamares de carga vertical aplicada. Estas extensões são a média dos valores obtidos nos três varões instrumentados.

Quadro 3.9 – Extensões médias na armadura longitudinal superior em 3 patamares de carga

Ligação	Modelo	Parafuso de reforço	Força	V_{exp}	V = 200 kN	V = 250 kN
			inicial dos parafusos (kN)		$\epsilon_{méd}$ (‰)	$\epsilon_{méd}$ (‰)
-	R	-	-	269 / 2.2	1.5	2.0
Não Aderente	M6	M6	3.3	331 / 2.7	1.4	2.0
	M8	M8	4.7	380 / - ²	1.8	2.4
Aderente	M6b	M6	2.4	374 / 1.8	1.5	1.9
	M8b	M8	4.1	365 / 2.3	1.7	2.2

Nota: $F_{i,p}$ – força inicial dos parafusos de reforço; V_{exp} – carga de rotura experimental; $\epsilon_{méd}$ – extensão média correspondente a V_{exp}

Da análise do Quadro 3.9, observa-se que a introdução dos parafusos de reforço originou um incremento das extensões médias da armadura longitudinal, com excepção dos modelos com parafusos M6. Este incremento é tanto maior quanto maior o diâmetro dos parafusos de reforço. Contudo, verifica-se que a presença de resinas origina diferenças de comportamento quando comparados com o modelo de referência e os modelos não aderentes.

² Não foi possível obter a leitura da extensão média na rotura do modelo M8 em virtude de os extensómetros se terem danificado.

Nos modelos aderentes, não se verifica um comportamento típico de entrada em cedência de nenhum dos varões instrumentados.

Com os modelos ensaiados, comprova-se a interdependência entre o aumento de carga vertical e a existência de maiores tensões sobre o pilar, o que origina as maiores extensões, quer numa direcção quer noutra, pelo início de perda de rigidez da laje devido à fendilhação. Por outro lado, é notória a diminuição das mesmas no seu afastamento em relação ao pico (zona de Pilar), devido à diminuição de esforços na laje entre o pilar e os bordos (zona de momentos nulos), ou seja, verifica-se um menor campo de tensões.

Comparando os modelos aderentes e não aderentes com parafusos de reforço do tipo M6, constatamos um incremento de extensão para uma carga vertical de 200 kN e uma diminuição de extensão tanto para a carga de 250 kN como para a sua carga de rotura.

Nos modelos com parafusos de reforço do tipo M8, verificamos que no modelo M8b (aderente), o valor das suas extensões são sempre inferiores ao seu homólogo para os patamares em estudo.

As distribuições de extensão transversais são, em geral, as expectáveis, com valores mais elevados nos varões junto ao pilar, em correspondência com as maiores tensões aí convergentes devido a momentos flectores e esforços de corte.

3.7.2 Deslocamentos Verticais

Com os resultados provenientes dos deflectómetros instalados, construíram-se três tipos de gráficos:

- Para os modelos ensaiados com o mesmo tipo de parafusos de reforço, foram elaborados gráficos do deslocamento em função da carga vertical aplicada;
- Para cada modelo ensaiado foi elaborada a deformada para certos patamares de carga;
- Para os modelos ensaiados com o mesmo tipo de parafusos de reforço e em comparação com o modelo de referência, foi construído um gráfico do deslocamento em função da relação entre a carga aplicada e a carga de rotura do respectivo modelo.

Para uma comparação mais simples entre ensaios aderentes e não aderentes foi realizada a média entre os resultados obtidos de deflectómetros diametralmente opostos em relação ao centro do modelo (deflectómetro 3); apresentando-se os gráficos de evolução média do

deslocamento vertical a 750 mm (média dos deflectómetros 1 e 5) e a 300 mm (média dos deflectómetros 2 e 4) do centro, em função da carga aplicada.

Todos os gráficos que a seguir se apresentam englobam a fase de fendilhação e a fase de rotura, pela mesma razão anteriormente referenciada, a existência de deformações residuais impostas pela fase de fendilhação.

3.7.2.1 Modelos R, M6 e M6b

Observando a Figura 3.42 e a Figura 3.43, verificamos que a injeção de resinas no espaço em volta dos parafusos pré-esforçados (modelo M6b), mantendo o diâmetro dos mesmos, provocou uma menor deformação do modelo até uma carga próxima dos 300 kN, em relação ao modelo sem injeção (M6).

No entanto, os deslocamentos finais obtidos no modelo M6b foram superiores, mas associados a uma também superior carga de rotura experimental.

A utilização de parafusos transversais pré-esforçados, originou uma redução dos deslocamentos da estrutura, quando comparados com o modelo de referência.

A deformação dos modelos reforçados tem um aumento gradual com o aumento de carga. Fenómeno este, importante pelo aumento da ductilidade da estrutura imposta pelo reforço. Situação bem evidenciada no modelo aderente (M6b).

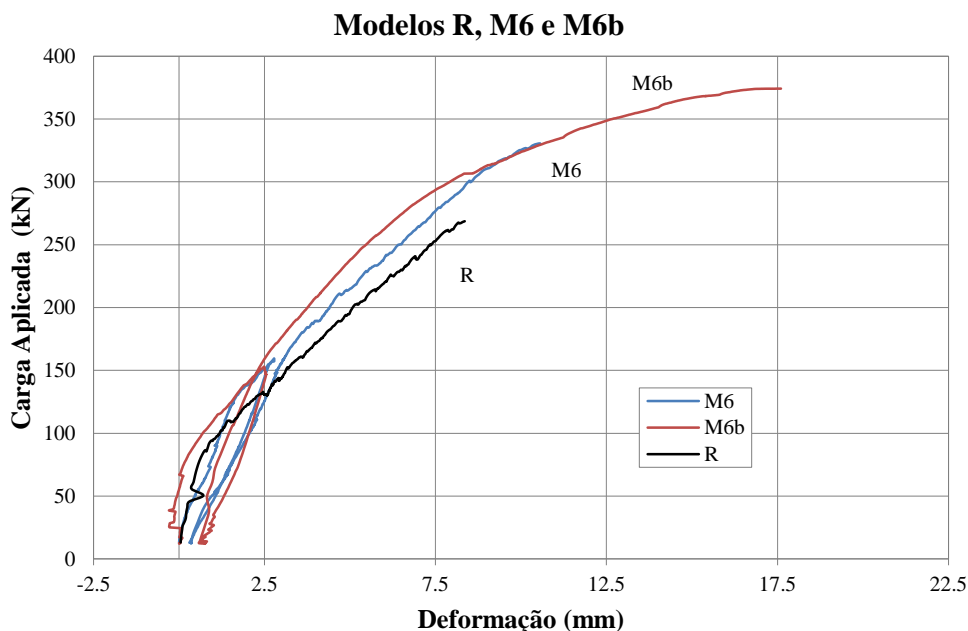


Figura 3.42 – Evolução dos deslocamentos verticais com a carga vertical aplicada nos modelos R, M6 e M6b a uma distância de 750mm do centro, na direcção “E-O”

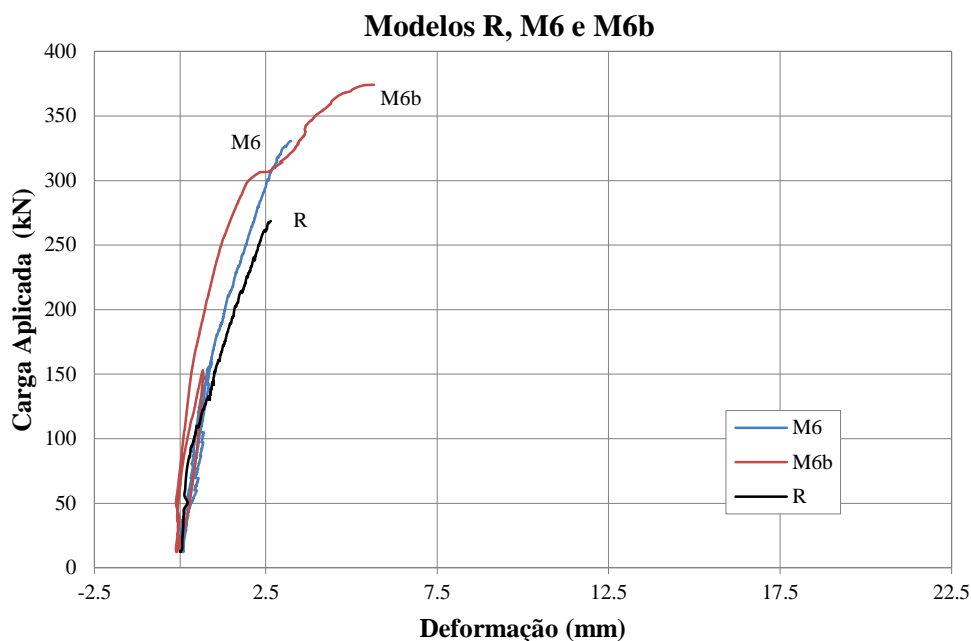


Figura 3.43 – Evolução dos deslocamentos verticais com a carga vertical aplicada nos modelos R, M6 e M6b a uma distância de 300mm do centro, na direcção “E-O”

Observando a deformada para vários patamares de carga dos modelos R, M6 e M6b, Figura 3.44, verificamos que a deformação dos modelos é sensivelmente em torno do eixo do pilar. Esta rotação é ligeiramente menor no modelo aderente (M6b) assim como a sua deformação para patamares inferiores a 300 kN, em comparação com o modelo não aderente (M6).

Este fenómeno conduz a valores diferentes de carga de rotura e deslocamentos ao longo dos modelos. 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.

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).

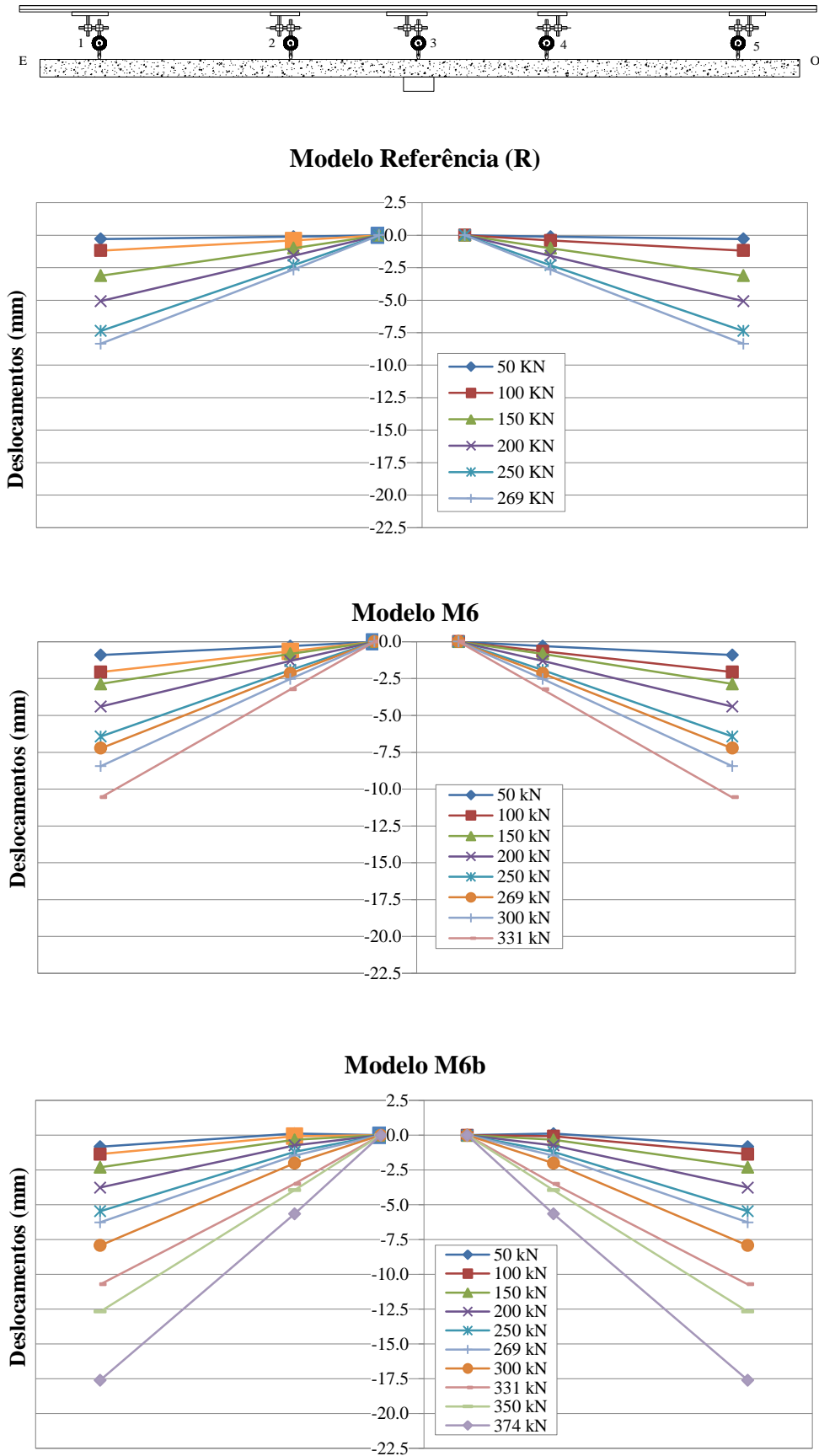


Figura 3.44 – Deformada na direção “E-O” para vários patamares de carga (modelos R, M6 e M6b)

Na figura seguinte, apresenta-se o gráfico de deslocamento máximo em função da relação entre a carga aplicada e a carga de rotura, para os modelos reforçados, aderentes e não aderentes, comparando-os com o modelo de referência.

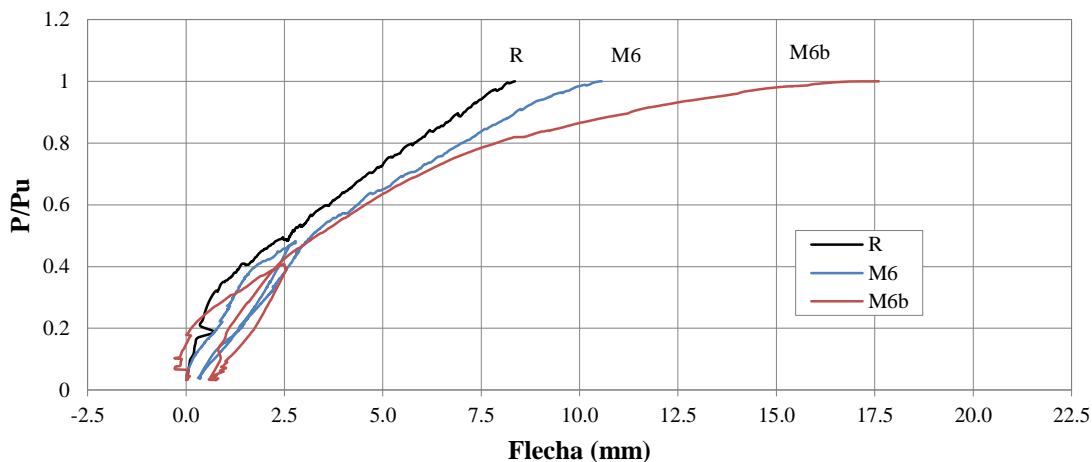


Figura 3.45 – Flecha dos modelos R, M6 e M6b na direcção “E-O”

Comparando o modelo de referência R e os modelos M6 e M6b, verificamos que o modelo aderente, em todos os patamares considerados, obteve o maior valor de deformação, e o maior valor de carga de rotura associado à maior deformação final. A injeção de resina epoxídica no espaço entre o modelo e o parafuso conduziu a um aumento de carga de 39 % em relação ao modelo de referência de 13 % em relação ao modelo não aderente, contribuindo para um comportamento bem diferente entre modelos. Ao observarmos a Figura 3.45, verificamos que a resina contribui para o aumento da ductilidade da laje.

3.7.2.2 Modelos R, M8 e M8b

Comparando as deformadas dos modelos R, M8 e M8b, verificamos que existe alguma proximidade em termos de deslocamentos nos vários patamares de carga apresentados, até ser atingido o valor de carga de rotura do modelo de referência. Em termos de valor de carga de rotura, o modelo aderente obteve um acréscimo de carga de aproximadamente 36 % em relação ao modelo de referência e um decréscimo de 4 % em relação ao modelo não aderente com o mesmo tipo de parafusos pré-esforçados. A grande diferença entre ambos verifica-se no deslocamento final e nos dois tipos de comportamento verificados, quando comparados com a relação de carga por carga final em relação ao seu deslocamento (Figura 3.49).

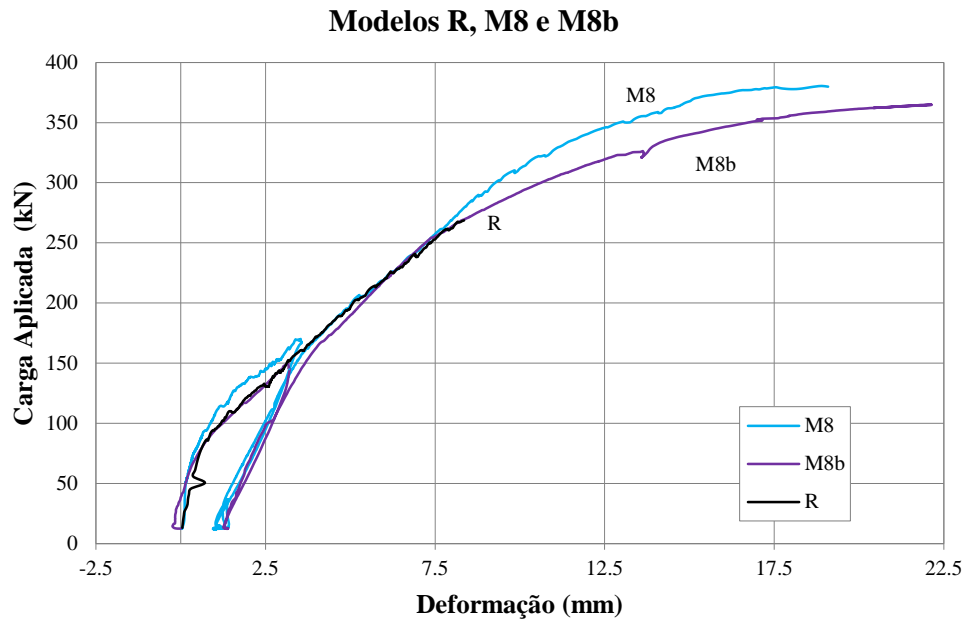


Figura 3.46 – Evolução dos deslocamentos verticais com a carga vertical aplicada nos modelos R, M8 e M8b a uma distância de 750 mm do centro, na direcção “E-O”

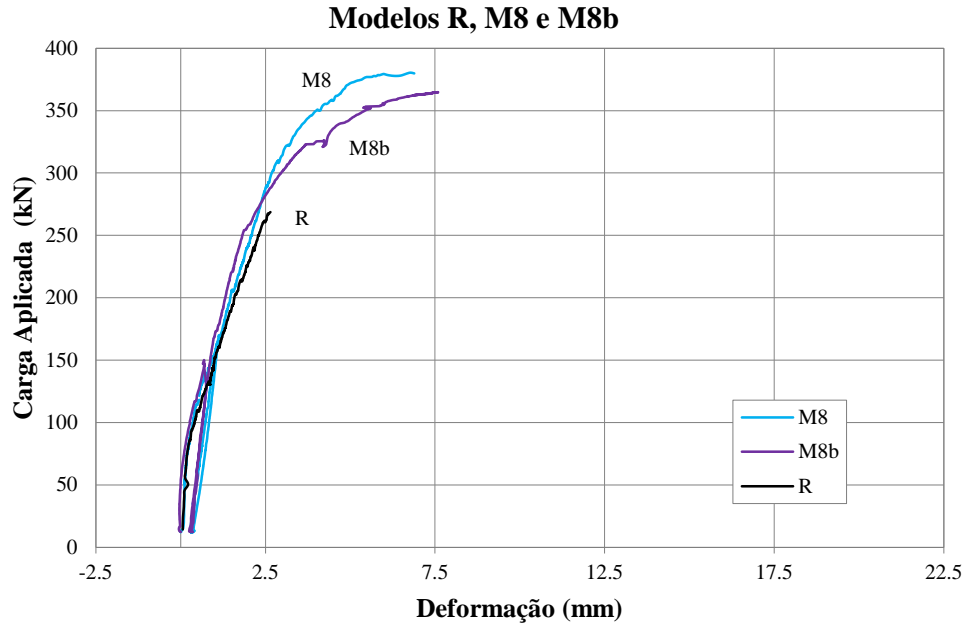
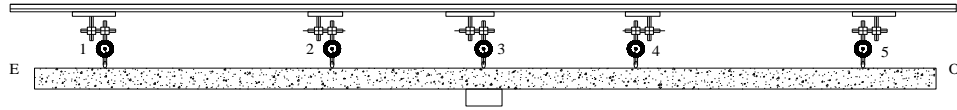
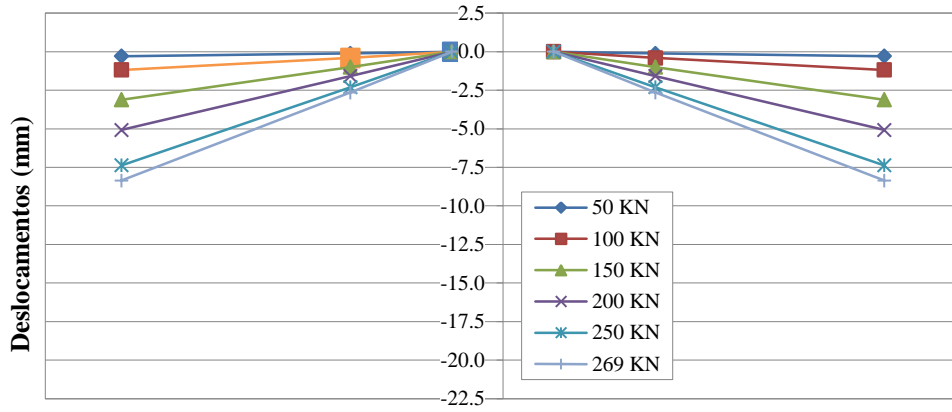


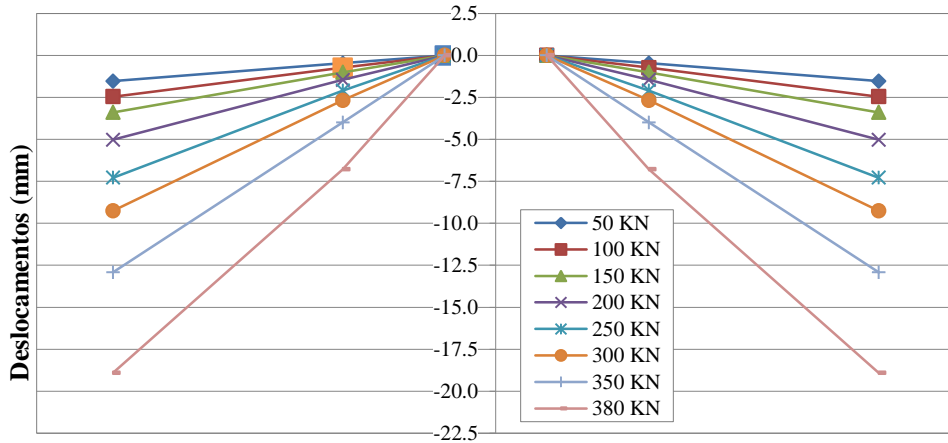
Figura 3.47 – Evolução dos deslocamentos verticais com a carga vertical aplicada nos modelos M8 e M8b a uma distância de 300 mm do centro, na direcção “E-O”



Modelo Referência (R)



Modelo M8



Modelo M8b

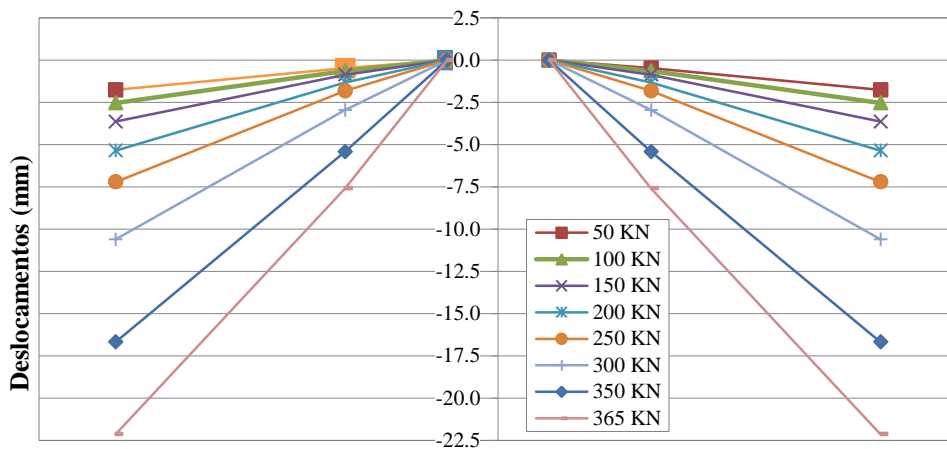


Figura 3.48 - Deformada na direcção “N-S” para vários patamares de carga (modelos M8 e M8b)

Na figura seguinte, apresenta-se o gráfico de deslocamento máximo em função da relação entre a carga aplicada e a carga de rotura, para os modelos reforçados, aderentes ou não, comparando-os com o modelo de referência.

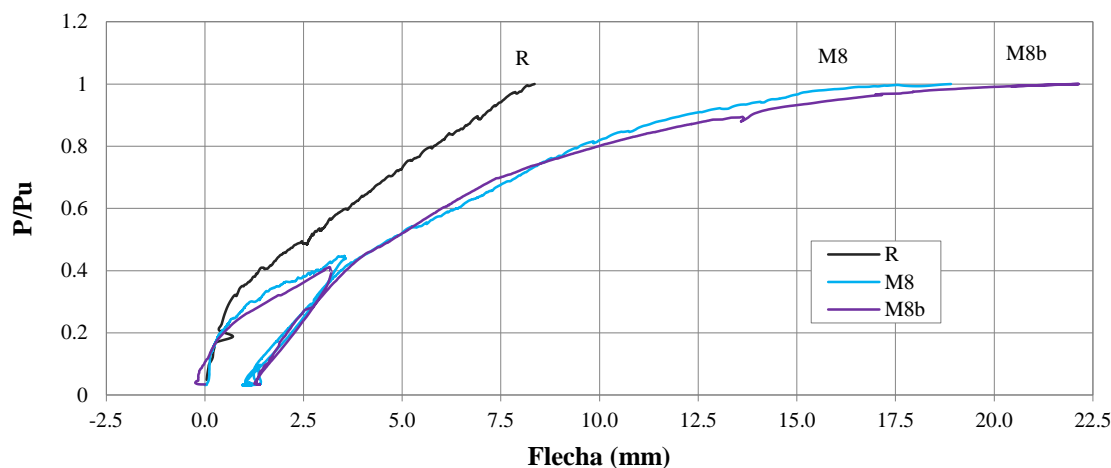


Figura 3.49 – Flecha dos modelos R, M8 e M8b, na direcção “E-O”

Para o modelo M8 obtemos um valor final de deslocamentos de 18.9 mm, superior em 2.25 vezes ao valor 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 em relação ao 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.

Examinando e comparando o modelo de referência com os modelos sujeitos a um reforço pela aplicação dos parafusos com ou sem a resina, Figura 3.45 e Figura 3.49, constatamos o aumento da deformação dos modelos. Quanto maior o diâmetro dos parafusos e melhor ligação (ligação aderente), maior a sua deformação.

3.7.2.3 Observações gerais

Observando as figuras das deformadas apresentadas anteriormente, podemos constatar que as rotações se concentram sobretudo junto ao pilar, produzindo deformações plásticas, originadas pela forte fendilhação tangencial nesta zona. Este facto é tanto mais visível quanto maior for o valor da carga vertical aplicada. A deformação dos modelos pode ser comparada à deformação de um corpo rígido em torno de um eixo, que neste caso é, sensivelmente, o eixo do pilar.

No quadro seguinte apresentam-se os deslocamentos verticais máximos registados na direcção “N-S” (média dos valores registados nos deflectómetros 1 e 5) para uma carga

vertical de 200 kN, 250 kN e 269 kN. Esta última carga correspondente à carga de rotura do modelo de referência.

Quadro 3.10 – Deslocamentos em 3 patamares de carga

Tipo de Reforço	Modelo	Parafuso de reforço	$F_{i,p}$ (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
	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: $F_{i,p}$ – força inicial dos parafusos de reforço; V_{exp} – carga de rotura experimental; $\epsilon_{méd}$ – extensão média correspondente a V_{exp}

Através do Quadro 3.10 e as figuras anteriormente apresentadas, e, comparando o modelo de referência com os modelos aderentes e não aderentes, verificamos que as deformadas diminuem com a introdução dos parafusos transversais (modelo R quando comparado com os restantes), para patamares de carga semalhantes.

Comparando a introdução de resina epoxídica, na ligação entre a laje e os parafusos, verificamos que a resina conduz a comportamentos bem distintos entre modelos.

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). Entre o modelo M8 e M8b, verifica-se que a influência da resina conduz a modelos mais dúcteis.

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.

3.7.3 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 3.50 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 enunciados no ponto 3.4.

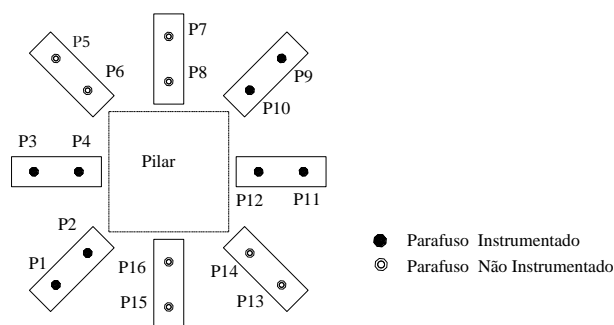


Figura 3.50 – Planta de parafusos instrumentados

Para cada tipo de parafuso, elaborou-se um gráfico da extensão em função da força aplicada e aproximaram-se os segmentos do gráfico a rectas cujas expressões permitiram calcular a força nos parafusos através da extensão correspondente.

Seguidamente, serão apresentados os gráficos obtidos a partir dos resultados experimentais das forças dos parafusos instrumentados em função da carga aplicada, para os dois tipos de parafusos de reforço (M6 e M8). Os gráficos serão apresentados, inicialmente, entre a sua posição individual e, posteriormente em relação à posição global (exterior ou interior). Será ainda apresentado um quadro resumo das forças iniciais e finais de todos os parafusos.

3.7.3.1 Modelos M6 e M6b

O aspecto das faces inferior e superior do modelo M6b após as operações de reforço é o observado na Figura 3.51.

Por anomalia ou dano dos extensómetros do parafuso 2, do modelo M6, não foi possível a recolha de dados relativos a este parafuso.



Figura 3.51 – Face superior e inferior do modelo M6b após reforço

Seguidamente, serão apresentados os gráficos dos resultados experimentais das forças nos parafusos instrumentados nos modelos M6 e M6b em função da carga aplicada.

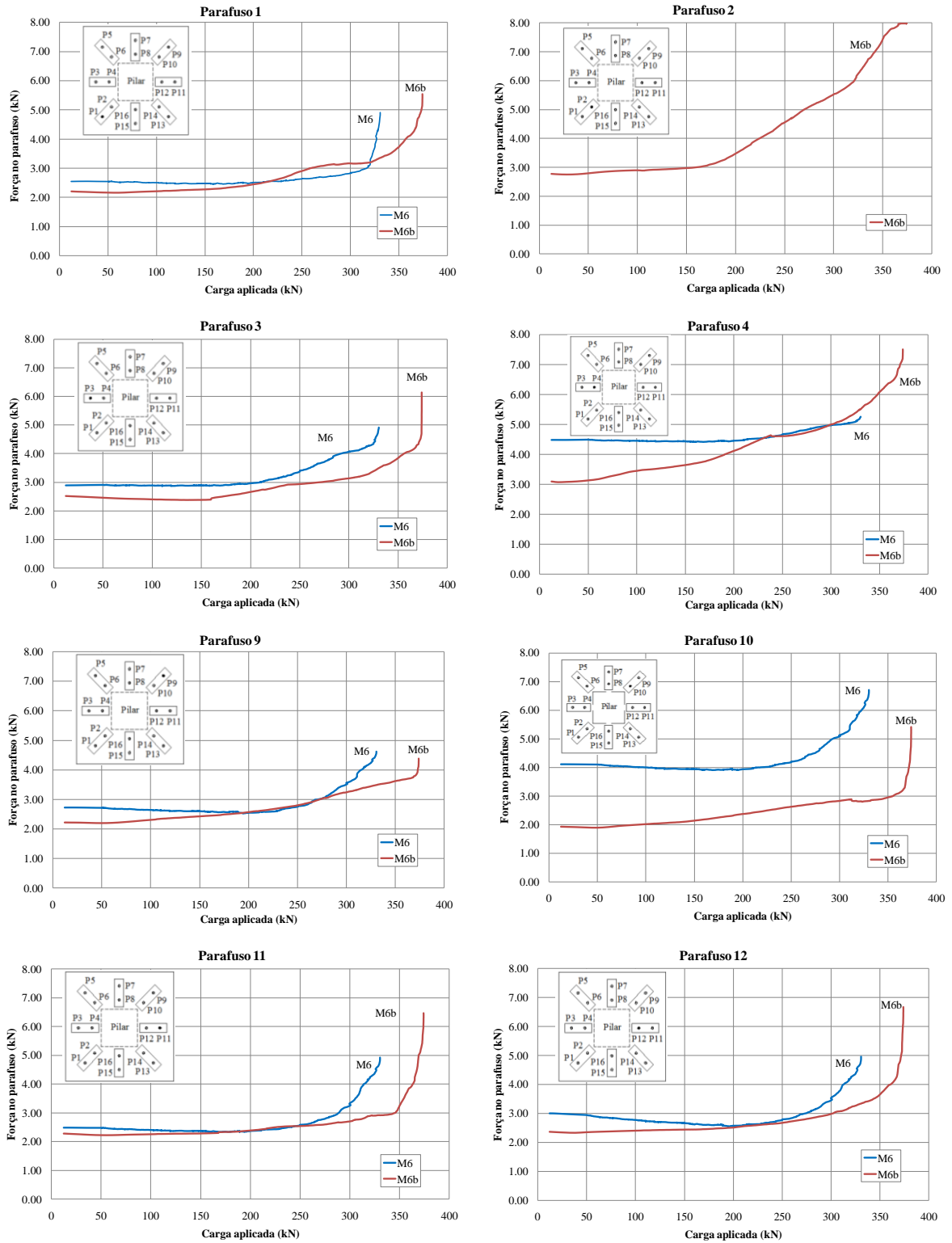


Figura 3.52 – Evolução da força nos parafusos 1, 2, 3, 4, 9,10,11 e 12 dos modelos M6 e M6b

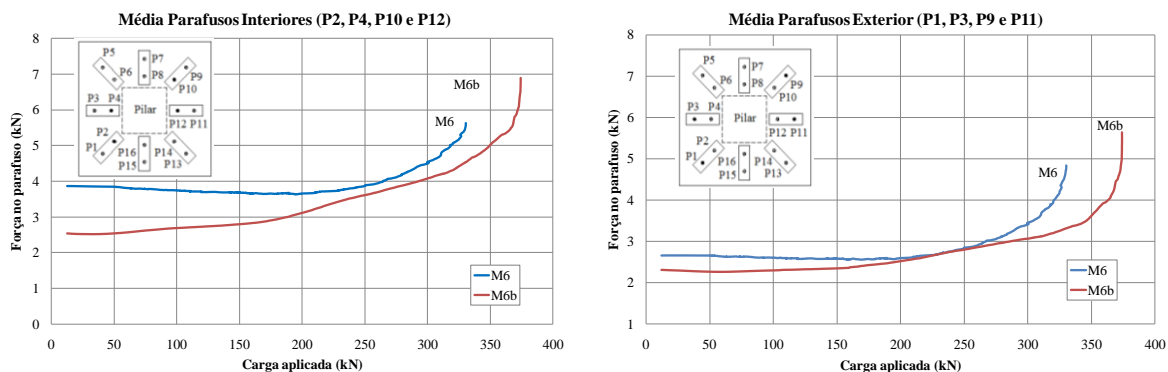


Figura 3.53 – Evolução da força média nos parafusos Interiores e Exteriores dos modelos M6 e M6b

O quadro seguinte apresenta um resumo, das forças iniciais e finais, de todos os parafusos instrumentados, nos modelos M6 e M6b.

Quadro 3.11 – Resumo das forças iniciais e finais de todos os parafusos nos modelos M6 e M6b

Parafuso	Modelo M6 (não aderente)			Modelo M6b (aderente)			
	F_i (kN)	F_f (kN)	Variação(kN)	F_i (kN)	F_f (kN)	Variação	
Exteriores	1	2.5	4.9	2.4	2.2	5.5	3.3
	3	2.9	4.9	2.0	2.5	6.1	3.6
	9	2.7	4.6	1.9	2.2	4.4	2.2
	11	2.5	4.9	2.4	2.3	6.5	4.2
	Média	2.7	4.8	2.2	2.3	5.6	3.3
Interiores	2	-	-	-	2.8	8.0	5.2
	4	4.5	5.2	0.8	3.1	7.5	4.4
	10	4.1	6.7	2.6	1.9	5.4	3.5
	12	3.0	5.0	2.0	2.4	6.7	4.3
	Média	3.9	5.6	1.8	2.5	6.9	4.4

Nota: F_i – força inicial aplicada ao parafuso; F_f – força final aplicada ao parafuso

No modelo M6 (não aderente), na sua fase inicial de carregamento, a força instalada nos parafusos manteve-se praticamente constante. A partir de sensivelmente 200 kN de carga vertical aplicada ao modelo, verifica-se um incremento acentuado de força nos mesmos, denotando-se uma maior solicitação dos parafusos de reforço.

No modelo M6b (aderente), o comportamento é idêntico ao modelo M6, contudo a sua fase inicial é substancialmente menor. A força instalada nos parafusos apenas é constante até cerca de 50 kN, a partir da qual cresce com o incremento de força aplicado ao modelo.

No modelo aderente, a força inicial instalada nos parafusos é menor em relação aos não aderentes; contudo, estes são solicitados praticamente logo no início do carregamento, ao passo que os do modelo homólogo apenas o são já numa fase mais avançada de carregamento.

Na fase final de carregamento, os parafusos aderentes são os mais solicitados (aproximadamente 20 %), em comparação com os não aderentes, fruto de uma carga aplicada ao modelo superior em 13 % ($V_{exp(M6)} = 331 \text{ kN}$ e $V_{exp(M6b)} = 374 \text{ kN}$).

3.7.3.2 Modelos M8 e M8b

Na figura seguinte apresenta-se o aspecto final das faces superior e inferior do modelo M8b após as operações de reforço.



Figura 3.54 – Face superior e inferior do modelo M8b após reforço

Seguidamente, serão apresentados gráficos dos resultados experimentais das forças dos parafusos instrumentados, nos modelos M8 e M8b, em função da carga aplicada.

De salientar que no modelo M8, ambos os extensómetros do parafuso 12 ficaram danificados, não se apresentando os resultados para este parafuso.

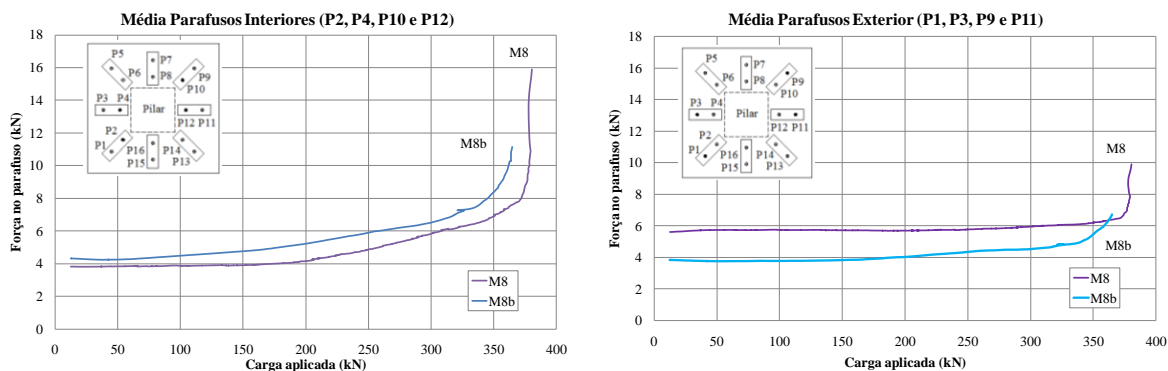


Figura 3.55 – Evolução da força média nos parafusos Interiores e Exteriores dos modelos M8 e M8b

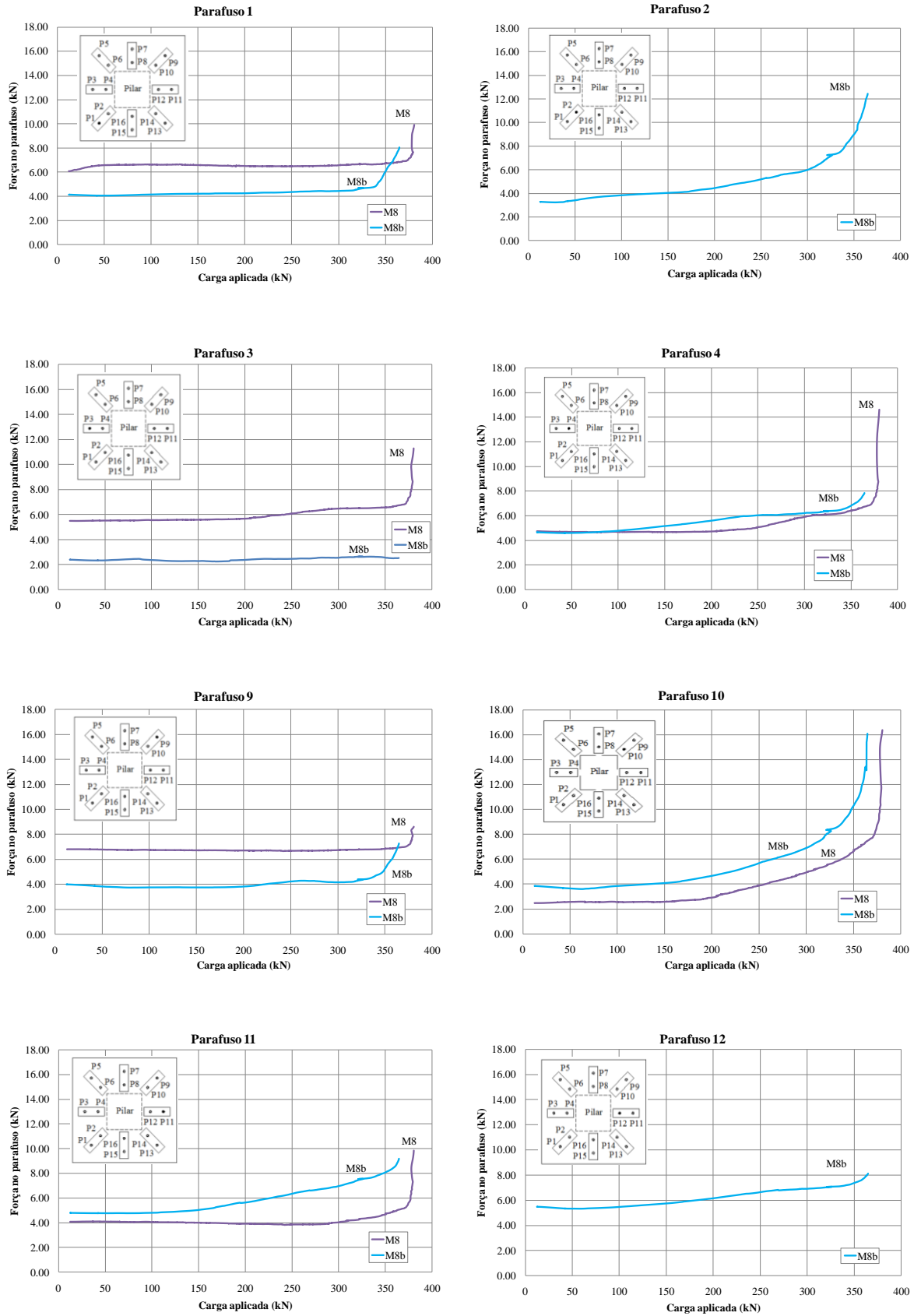


Figura 3.56 – Evolução da força no parafuso 1, 2, 3, 4, 5, 9, 10, 11 e 12 dos modelos M8 e M8b

O quadro seguinte apresenta um resumo das forças, iniciais e finais, de todos os parafusos instrumentados, nos modelos M8 e M8b.

Quadro 3.12 – 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	
Exteriores	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
Interiores	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

Nota: F_i – força inicial aplicada ao parafuso; F_f – força final aplicada ao parafuso

De uma forma geral, tal como nos modelos M6 e M6b, os parafusos interiores dos modelos M8 e M8b 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.

3.7.4 Comportamento na rotura

Todos os modelos ensaiados apresentaram uma rotura por punçoamento. As superfícies de rotura ao punçoamento foram diferentes entre tipos de reforços. Contudo, desenvolveram-se sempre com uma forma de tronco de pirâmide invertido. Nas figuras seguintes são apresentados alguns pormenores das roturas obtidas por punçoamento e fotografias da face superior dos modelos após os ensaios. No anexo I apresenta-se uma reportagem fotográfica mais exaustiva das roturas obtidas.

Em relação ao tipo de rotura, podemos destacar:

- No modelo de referência (R), não reforçado, a superfície de rotura desenvolve-se desde o perímetro do pilar na face em compressão até à face em tracção (Figura 3.57), com a forma de um tronco de pirâmide invertido.

- No modelo M6, a rotura dá-se pelo interior do reforço. Neste modelo, todos os oito parafusos da camada interior atingem a rotura, assim como três da camada exterior (Figura 3.58).
- No modelo M8 (Figura 3.59), a superfície de rotura intersecta a face em compressão pelo exterior dos parafusos de reforço (rotura exterior ao reforço), não se verificando qualquer tipo de rotura nos parafusos (Figura 3.62).
- Nos modelos em que os parafusos de reforço eram aderentes, as superfícies de rotura foram idênticas às dos modelos análogos não aderentes, isto é, registaram-se pelo interior do reforço no modelo M6b (Figura 3.60) e pelo exterior ao reforço no modelo M8b (Figura 3.61).



Figura 3.57 – Vista superior e Inferior do modelos de Referência (R).



Figura 3.58 – Vista superior e inferior do modelo M6 após rotura



Figura 3.59 – Vista superior e inferior do modelo M8 após rotura



Figura 3.60 – Vista superior e inferior do modelo M6b após rotura

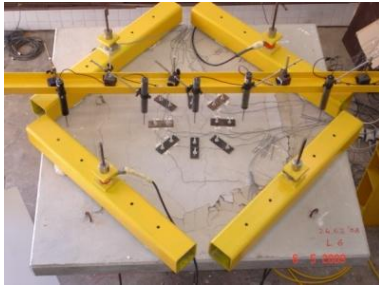


Figura 3.61 – Vista superior e inferior do modelo M8b após rotura



Figura 3.62 – Pormenor dos parafusos depois de rotura por punçoamento nos Modelos M6 a M8

3.8 CARGAS DE ROTURA EXPERIMENTAIS

Neste subcapítulo será realizada uma análise comparativa da carga de rotura, tendo em conta a regulamentação existente e descrita no capítulo 2, a qual será comparada com os valores obtidos experimentalmente.

Desta forma, independentemente da resistência do betão em cada modelo, foram calculados os valores normalizados para a carga de rotura.

Apresenta-se igualmente um valor de carga de rotura experimental normalizado (V_{norm}), considerando apenas o efeito do betão, que foi obtido pela seguinte expressão:

$$V_{norm,1} = V_{exp} \sqrt[3]{\frac{f_{cm}}{f_{cm,i}}} = V_{exp} \sqrt[3]{\frac{41.8}{f_{cm,i}}} \quad (3.6)$$

Onde:

$\overline{f_{cm}}$ média das resistências à compressão do betão de todos os modelos;

$f_{cm,i}$ resistência à compressão do respectivo modelo.

Quadro 3.13 – Valores experimentais normalizados

Modelo		f_{cm} (MPa)	V_{exp} (kN)	V_{norm} (kN)	V_{norm}/V_{ref}
Não Aderente	R	39.3	269	275	1.00
	M6	47.7	331	317	1.15
	M8	47.7	380	364	1.32
Aderente	M6b	36.7	374	391	1.42
	M8b	37.7	365	378	1.37

Nota: f_{cm} – valor médio da tensão de rotura à compressão do betão em provetes cilíndricos; V_{exp} – valor de carga de rotura experimental; V_{norm} – valor de carga de rotura normalizado; V_{ref} – valor da carga de rotura do modelo de referência (R)

Observando o quadro em cima, constatamos incrementos de resistência substanciais nos modelos reforçados, especialmente nos modelos com ligação do tipo aderente. De facto, estes incrementos de resistência nos modelos não aderentes variou de 15 % (M6) a 32 % (M8), enquanto nos modelos aderentes variou de 37 % (M8b) a 42 % (M6b).

A existência de aderência entre os parafusos de reforço e a laje, contribui para um melhor desempenho desta solução.

Considerando agora outro método de normalização, e não desprezando a parcela da resistência por efeitos da armadura longitudinal, apresenta-se igualmente um valor de carga de rotura experimental normalizado (V_{norm}), pela seguinte expressão:

$$V_{norm,2} = V_{Rd,c} \sqrt[3]{\frac{f_{cm}}{f_{cm,i}}} + V_{Rd,s} \quad (3.7)$$

Sendo:

$\overline{f_{cm}}$ média das resistências à compressão do betão de todos os modelos;

$f_{cm,i}$ resistência à compressão do respectivo modelo;

$V_{Rd,c}$ valor de cálculo da resistência ao punçoamento sem armadura específica, calculada por:

$$V_{Rd,c} = 0.18 \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) \sqrt[3]{100 \rho_l f_{cm}} u d \quad (3.8)$$

$V_{Rd,s}$ valor de cálculo da parcela da armadura no cálculo da carga de rotura normalizada, considerando a parcela do betão e da armadura, calculada por:

$$V_{Rd,s} = V_{exp} - V_{Rd,c} \quad (3.9)$$

Quadro 3.14 – Valores experimentais normalizados

Modelo		f_{cm} (MPa)	ρ_l (%)	d (mm)	u (mm)	V_{exp} (kN)	$V_{Rd,c}$ (kN)	V_{norm} (kN)	V_{norm}/V_{ref}
Não Aderente	R	39.3	1.20%	87.1	1895	269	270	275	1.00
	M6	47.7	1.17%	89.5	1925	331	296	318	1.16
	M8	47.7	1.16%	90.3	1935	380	298	367	1.34
Aderente	M6b	36.7	1.07%	94.1	1982	374	281	387	1.41
	M8b	37.7	1.07%	94.9	1993	365	287	375	1.37

Nota: f_{cm} – valor médio da tensão de rotura à compressão do betão em provetes cilíndricos; ρ_l – percentagem geométrica de armadura de flexão; d – altura útil; u – perímetro do contorno de referência; $V_{Rd,c}$ – valor de cálculo da resistência ao punçoamento sem armadura, V_{exp} – valor de carga de rotura experimental; V_{norm} – valor de carga de rotura normalizado; V_{ref} – valor da carga de rotura do modelo de referência (R)

Observando o Quadro 3.13 e o Quadro 3.14, constatamos incrementos de resistência muito semelhantes nos modelos reforçados. De facto, estes incrementos de resistência nos modelos, variam apenas na ordem de 1 %, o que por si só, é uma variação irrelevante. Desta forma, podemos considerar que ambas as expressões normalizadas são válidas e que, o facto de se considerar a contribuição da resistência por parte da armadura longitudinal não trás alterações em relação ao incremento de carga.

Todos os modelos ensaiados atingiram a rotura por punçoamento. Contudo, a utilização de parafusos enquanto armadura transversal de reforço aumenta a ductilidade da conexão pilar-laje e altera o modo de rotura da laje, passando de uma rotura clara de punçoamento (modelo de referência) para uma rotura mista entre corte e flexão, mas mais próxima da flexão, especialmente nos modelos aderentes e ou com maior armadura transversal (M8, M6b e M8b).

Quadro 3.15 – Carga de rotura experimental vs Carga de rotura de flexão de cálculo

Modelo		V_{exp} (kN)	$V_{flexão}$ (kN)
Não Aderente	R	269	374
	M6	331	381
	M8	380	381
Aderente	M6b	374	372
	M8b	365	373

Nota: V_{exp} – valor de carga de rotura experimental; $V_{flexão}$ – valor de carga de rotura de flexão de cálculo

Observando o Quadro 3.15, constatamos que o modelo de referência (R) e o modelo reforçado com parafusos de menor diâmetro não aderentes (M6), estão longe da rotura por flexão, contrária aos modelos M8, M6b e M8b (modelos aderentes e ou com maior diâmetro da armadura de reforço), em que a sua rotura por punçoamento foi obtida para uma carga próxima do valor calculado para a rotura por flexão, e logo influenciado por esta.

3.8.1 EC2

Segundo o EC2 [8], o valor médio do esforço resistente ao punçoamento sem armaduras específicas é dado pela Eq (3.5):

$$V_{Rm,1} = 0.18 k (100 \rho_l f_{cm})^{1/3} u d \quad (3.10)$$

Sendo:

$$K = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2 \quad (d \text{ em mm}) \quad (3.11)$$

$$\rho_l = \sqrt{\rho_{lx} \rho_{ly}} \leq 0.02 \quad (3.12)$$

$$u = 2 (c_x + c_y) + 4 \pi d \quad (3.13)$$

Onde ρ_{lx} e ρ_{ly} são as percentagens geométrica das armaduras (aderentes) de flexão da laje, segundo x e y, respectivamente, considerando o seu valor médio numa largura igual à do pilar adicionada de 3d para cada lado deste; sendo, u o perímetro do contorno de referência à distância de 2.0d da face do pilar e d a altura útil da laje.

Segundo o presente regulamento, k deve ser limitado a 2.0, no entanto, serão apresentados os resultados com e sem esta limitação.

Em virtude de os modelos usarem parafusos de reforço como armaduras específicas, o valor médio do esforço resistente ao punçoamento, sem a limitação da tensão nos parafusos é dado pela Eq (3.9):

$$V_{Rm,2} = 0.75 V_{Rm,1} + F_{P0.2} n \quad (3.14)$$

E, considerando a limitação da tensão no aço dos parafusos:

$$V_{Rm,2} = 0.75 V_{Rm,1} + A_{sw,b} f_{sy,ef} n \quad (3.15)$$

em que:

$A_{sw,b}$ área transversal do parafuso

$$f_{sy,ef} = 1.15 (250 + 0.25 d) < f_{sy} \quad (d \text{ em mm}) \quad (3.16)$$

n número de parafusos transversais que se encontram no interior do perímetro de referência.

Caso a rotura ocorra fora do perímetro do reforço, o valor médio do esforço resistente ao punçoamento é dado pela expressão:

$$V_{Rm,3} = 0.18 k (100 \rho_l f_{cm})^{1/3} u^* d \quad (3.17)$$

Sendo u^* o perímetro de contorno definido a uma distância de 2d do perímetro definido pelas armaduras de reforço.

Quadro 3.16 – Comparação entre as cargas de rotura experimentais e previstas segundo o EC2 (Resultados sem limitação da tensão no aço dos parafusos e sem limitação de k)

	Modelo	k	ρ_1 (%)	u (mm)	u* (mm)	V _{Rm,1} (kN)	V _{Rm,2} (kN)	V _{Rm,3} (kN)	V _{exp} (kN)	V _{exp} /V _{Rm}
Não Aderente	R	2.51	1.20	1895	-	270	-	-	269	1.00
	M6	2.49	1.17	1925	2660	296	334	408	331	0.99
	M8	2.49	1.16	1935	2670	298	460	411	380	0.93
Aderente	M6b	2.46	1.11	1983	2714	284	325	389	374	1.15
	M8b	2.45	1.10	1993	2716	289	454	394	365	0.93

Nota: k – factor de escala; ρ_1 – percentagem geométrica de armadura de flexão; u, u* – perímetro do contorno de referência; 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, sem limitação da tensão no aço dos parafusos; V_{Rm,3} – valor médio do esforço resistente ao punçoamento, caso a rotura ocorra fora do perímetro do reforço; V_{exp} – valor da carga de rotura experimental, V_{Rm} – valor médio do esforço resistente ao punçoamento

Quadro 3.17 – Comparação entre as cargas de rotura experimentais e previstas segundo o EC2 (Resultados com limitação da tensão no aço dos parafusos e sem limitação de k)

	Modelo	k	ρ_1 (%)	u (mm)	u* (mm)	V _{Rm,1} (kN)	V _{Rm,2} (kN)	V _{Rm,3} (kN)	V _{exp} (kN)	V _{exp} /V _{Rm}
Não Aderente	R	2.51	1.20	1895	-	270	-	-	269	1.00
	M6	2.49	1.17	1925	2660	296	306	408	331	1.08
	M8	2.49	1.16	1935	2670	298	366	411	380	1.04
Aderente	M6b	2.46	1.11	1983	2714	284	298	389	374	1.25
	M8b	2.45	1.10	1993	2716	289	359	394	365	1.02

Nota: k – factor de escala; ρ_1 – percentagem geométrica de armadura de flexão; u, u* – perímetro do contorno de referência; 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 no aço dos parafusos; V_{Rm,3} – valor médio do esforço resistente ao punçoamento, caso a rotura ocorra fora do perímetro do reforço; V_{exp} – valor da carga de rotura experimental, V_{Rm} – valor médio do esforço resistente ao punçoamento

Quadro 3.18 – Comparação entre as cargas de rotura experimentais e previstas segundo o EC2 (Resultados com limitação da tensão no aço dos parafusos e com limitação de k)

	Modelo	k	ρ_1 (%)	u (mm)	u* (mm)	V _{Rm,1} (kN)	V _{Rm,2} (kN)	V _{Rm,3} (kN)	V _{exp} (kN)	V _{exp} /V _{Rm}
Não Aderente	R	2.00	1.20	1895	-	215	-	-	269	1.25
	M6	2.00	1.17	1925	2660	237	262	328	331	1.26
	M8	2.00	1.16	1935	2670	240	321	331	380	1.18
Aderente	M6b	2.00	1.11	1983	2714	231	258	317	374	1.45
	M8b	2.00	1.10	1993	2716	236	319	321	365	1.14

Nota: K – factor de escala; ρ_1 – percentagem geométrica de armadura de flexão; u, u* – perímetro do contorno de referência; 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 no aço dos parafusos; V_{Rm,3} – valor médio do esforço resistente ao punçoamento, caso a rotura ocorra fora do perímetro do reforço; V_{exp} – valor da carga de rotura experimental, V_{Rm} – valor médio do esforço resistente ao punçoamento

As previsões do EC2 para o valor médio da resistência ao punçoamento, sem limitação da tensão no aço dos parafusos de reforço e no valor do k (Quadro 3.16), conduzem a um rácio V_{exp}/V_{Rm} de 1.00. No entanto, três dos quatro modelos reforçados deram valores de V_{exp}/V_{Rm} ligeiramente inferiores a 1.0, logo, ligeiramente contra a segurança.

Quando passamos a considerar a limitação para a tensão no aço dos parafusos, mas ainda sem a limitação do k (Quadro 3.17), somos conduzidos a uma relação média entre os valores experimentais e os previstos de 1.09, em que todos o modelos apresentam rácios V_{exp}/V_{Rm} acima da unidade.

Finalmente, considerando limites, tanto para a tensão no aço dos parafusos de reforço como para o valor do k (Quadro 3.18), o mesmo rácio médio passa a ser de 1.26, ou seja, valores algo conservadores.

3.8.2 ACI 318 – 08

O ACI 318 – 08 [1] define o valor médio de resistência ao punçoamento sem armadura específica, V_{Rm1} , por intermédio do menor valor dado pelas expressões:

$$\left(1 + \frac{2}{\beta_c}\right) \frac{\sqrt{f_{cm}} u d}{6} \quad (3.18)$$

$$\left(\alpha_s \frac{d}{u} + 2\right) \frac{\sqrt{f_{cm}} u d}{12} \quad (3.19)$$

$$\frac{1}{3} \sqrt{f_{cm}} u d \quad (3.20)$$

Onde:

- β_c quociente entre o lado maior e o lado menor do pilar,
- α_s toma os valor de 40 para pilares interiores, 30 para pilares de bordo e 20 para pilares de canto,
- u perímetro de controlo de referência, determinado a uma distância de 0.5d da face do pilar.

No caso de se adoptarem armaduras específicas de punçoamento, o ACI 318 – 08 apresenta a seguinte expressão para o cálculo do esforço médio resistente ao punçoamento:

$$V_{Rm2} = \frac{1}{6} \sqrt{f_{cm}} u d + F_{P0.2} n \quad (3.21)$$

Sendo, n o número de parafusos transversais.

Para situações onde ocorram roturas pelo exterior do reforço, o valor médio da resistência ao punçoamento, designado por V_{Rm3} , é definido pelo menor valor resultante das seguintes expressões:

$$\left(1 + \frac{2}{\beta_c}\right) \frac{\sqrt{f_{cm}} u^* d}{6} \tag{3.22}$$

$$\left(\alpha_s \frac{d}{u} + 2\right) \frac{\sqrt{f_{cm}} u^* d}{12} \tag{3.23}$$

$$\frac{1}{3} \sqrt{f_{cm}} u^* d \tag{3.24}$$

Sendo u^* , o perímetro de controlo modificado, definido a uma distância de $d/2$ do perímetro definido pelas armaduras de reforço. No caso em estudo, referente aos parafusos transversais

No quadro seguinte serão apresentados e comparados os resultados obtidos de acordo com o regulamento ACI 318 – 08 e os valores obtidos experimentalmente.

Quadro 3.19 – Resultados obtidos segundo o ACI 318 - 08

Modelo		d (mm)	u (mm)	u* (mm)	V _{Rm,1} (kN)	V _{Rm,2} (kN)	V _{Rm,3} (kN)	V _{exp} (kN)	V _{exp} /V _{Rm}
Não Aderente	R	87.1	1149	-	209	-	-	269	1.29
	M6	89.5	1158	1846	239	231	375	331	1.43
	M8	90.3	1161	1849	241	357	380	380	1.06
Aderente	M6b	94.1	1176	1829	223	224	348	374	1.67
	M8b	94.9	1180	1829	229	351	355	365	1.04

Nota: d – altura útil; u, u* – perímetro do contorno de referência; 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; V_{Rm,3} – valor médio do esforço resistente ao punçoamento, caso a rotura ocorra fora do perímetro do reforço

Como pode concluir-se da leitura do Quadro 3.19, o ACI 318 – 08 é um regulamento algo conservador, em especial para o modelo de referência (R) e para os modelos em que o reforço foi feito com recurso a parafusos obtidos de varão roscado de 6 mm (M6 e M6b). Nos modelos M8 e M8b a previsão para a carga de rotura segundo o ACI foi muito próxima da experimental. O rácio médio obtido entre V_{exp}/ V_{Rm} foi de 1.30.

3.8.3 Resumo

Tal como foi referido anteriormente, e observando o gráfico da Figura 3.63, verificamos que, de uma maneira geral, o ACI 318 – 08 é o regulamento mais conservador em termos de previsões para a resistência ao punçoamento, com excepção das situações onde se utiliza armadura transversal de 8 mm de diâmetro (caso dos modelos M8 e M8b).

Em termos globais, o regulamento Europeu é o que mais se aproxima em termos de previsões, dos valores obtidos experimentalmente. Porém, verificamos que as imposições de limitações são necessárias com a respectiva adequação. Basta ver que nas situações de menor armadura obtemos melhores resultados sem parte dessas mesmas restrições.

As previsões que melhor se aproximam dos resultados experimentais são obtidas com limitação da tensão no aço, mas sem limitação no k. A melhor adequação dos regulamentos conduz a estruturas mais seguras e estruturalmente equilibradas, isto é, de rigidez adequada e economicamente viáveis.

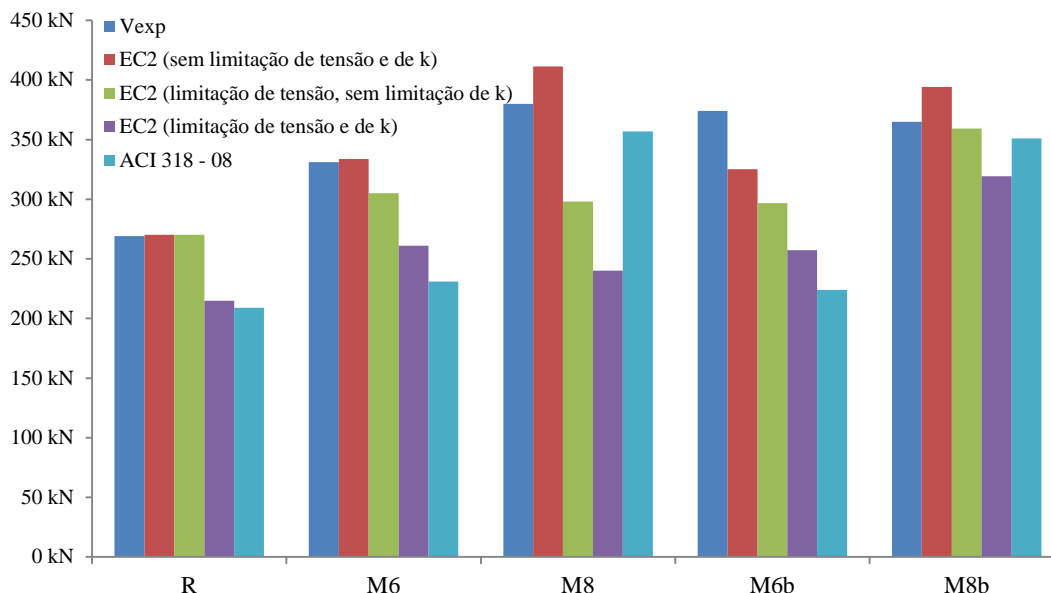


Figura 3.63 – Resumo e comparação de resultados obtidos experimentalmente (EC2 e ACI 318 – 08)

No quadro seguinte serão apresentados e comparados os resultados do modo de rotura previstos pelos regulamentos com os observados experimentalmente.

Quadro 3.20 – Resultados obtidos Experimentalmente, segundo o EC2 e o ACI 318 - 08

Modelo	Regulamento	Modo de rotura previsto	Modo de rotura experimental
M6	EC2 (sem Limitações)	Interior ao reforço	Interior ao reforço
	EC2 (Limitação da tensão)	Interior ao reforço	
	EC2 (Limitação da tensão e k)	Interior ao reforço	
	ACI 318 – 08	Interior ao reforço	
M6b	EC2 (sem Limitações)	Interior ao reforço	Interior ao reforço
	EC2 (Limitação da tensão)	Interior ao reforço	
	EC2 (Limitação da tensão e k)	Interior ao reforço	
	ACI 318 – 08	Interior ao reforço	
M8	EC2 (sem Limitações)	Exterior ao reforço	Exterior ao reforço
	EC2 (Limitação da tensão)	Interior ao reforço	
	EC2 (Limitação da tensão e k)	Interior ao reforço	
	ACI 318 – 08	Interior ao reforço	
M8b	EC2 (sem Limitações)	Exterior ao reforço	Exterior ao reforço
	EC2 (Limitação da tensão)	Interior ao reforço	
	EC2 (Limitação da tensão e k)	Interior ao reforço	
	ACI 318 – 08	Interior ao reforço	

Contrariamente às previsões da carga de rotura, o ACI 318 – 08 e o EC2, de um modo geral, não prevêm correctamente o modo de rotura dos modelos reforçados com parafusos de 8 mm, e prevêm correctamente o modo de rotura nos modelos reforçados com parafusos de 6 mm.

3.9 INCLINAÇÃO DAS SUPERFÍCIES DE ROTURA

Após a realização dos ensaios, procedeu-se ao corte dos modelos com serra circular, conforme Figura 3.64. Este corte foi executado de maneira a separar cada um dos modelos em quatro quartos (observe-se a Figura 3.66), com o objectivo de obter informações sobre a forma e a inclinação da superfície de rotura.

Elaborou-se um levantamento geométrico dos resultados obtidos. Este levantamento fotográfico é apresentado em Anexo.



Figura 3.64 – Corte do Modelo M8b em quatro quartos



Figura 3.65 – Visão global do modelo M8b após corte

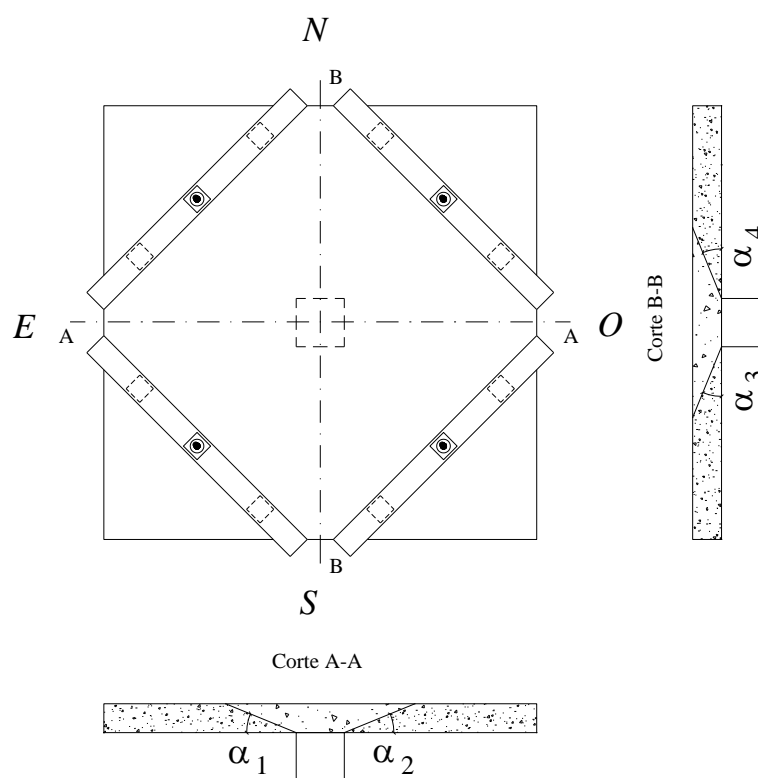


Figura 3.66 – Inclinações da superfície de rotura com a horizontal

No quadro que se segue, faz-se um resumo das inclinações da superfície de rotura com a horizontal, observadas em cada um dos cortes efectuados.

Quadro 3.21 – 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

Nota: α – ângulo formado pelas armaduras específicas de punçoamento com o plano da laje

Observando o Quadro 3.21, verifica-se que os modelos em que os parafusos foram aderentes apresentaram inclinações médias ligeiramente inferiores à dos modelos análogos com reforço não aderente.

Na Figura 3.67, são apresentadas fotografias de duas metades de um corte dos modelos M6b e M8b (modelos aderentes).

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 superior superfície de rotura no modelo M8b em relação ao seu homólogo.

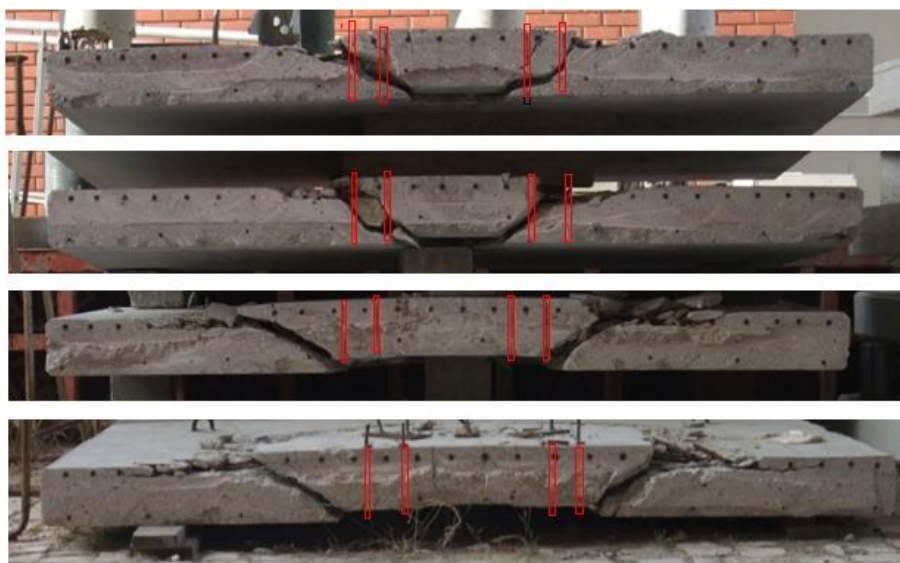


Figura 3.67 – Superfície de rotura dos modelos aderentes (2 metades superiores – M6b e 2 metades inferiores – M8b)

Em Anexo, serão apresentadas, com maior detalhe, fotografias dos modelos M6b e M8b após o corte dos mesmos. As fotografias evidenciam, de uma forma clara, a rotura, pelo interior, do 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.

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.

Capítulo 4

CONCLUSÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

4.1 INTRODUÇÃO

O presente estudo descreve os ensaios experimentais de modelos de laje fungiforme maciças reforçadas com parafusos verticais pré-esforçados aderentes e não aderentes.

Deverá ter-se em consideração o facto de cada sistema presente neste trabalho, apenas ter sido investigado com base num único resultado de teste (conclusões mais consistentes deverão ser tidas em consideração no caso de serem realizados mais modelos de teste para cada sistema apresentado).

Ainda assim, com os resultados experimentais obtidos, foi possível confirmar os seguintes aspectos:

- 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 existência de aderência entre os parafusos de reforço e a laje originou um melhor desempenho desta solução.

Neste capítulo será apresentada uma síntese dos principais resultados alcançados no decorrer deste trabalho, comentando-se os efeitos, nomeadamente, da armadura transversal com ou sem injeção de resina epoxídica. São focados, em particular, a influência destes factores nos seguintes aspectos: evolução das extensões na armadura longitudinal superior, deslocamentos verticais, evolução da força nos parafusos de reforço, cargas e modos de rotura ao punçoamento e inclinação na superfície de rotura em relação ao plano da laje.

Para finalizar este capítulo, faz-se referência a alguns assuntos relacionados com este estudo e não totalmente esclarecidos e apresentam-se sugestões para futuros desenvolvimentos nesta área.

4.2 O EFEITO DA ADERÊNCIA NA RESISTÊNCIA AO PUNÇAMENTO DE MODELOS REFORÇADOS COM PARAFUSOS VERTICAIS PRÉ-ESFORÇADOS

São aqui apresentadas as principais conclusões do estudo experimental levado a cabo em cinco modelos de laje maciça fungiforme. Quatro reforçados com parafusos verticais pré-esforçados e um utilizado como referência, não sendo reforçado.

Evidenciam-se as principais alterações constatadas a partir da variação entre a não injeção de resina epoxídica, do espaço em volta dos parafusos de reforço, e a sua injeção, considerando a sua ligação não aderente e aderente, respectivamente.

4.2.1 EXTENSÕES NAS ARMADURAS LONGITUDINAIS SUPERIORES

Constatou-se que, a introdução dos parafusos de reforço pré-esforçados conduziu a um aumento das extensões longitudinais superiores, tanto nos modelos aderentes, como nos não aderentes, em relação ao modelo de referência.

A injeção de resina no espaço entre os parafusos de reforço e a laje conduz a uma diminuição das extensões longitudinais em comparação com os modelos sem a respectiva injeção (modelos não aderentes).

Em geral, e para os patamares de carga apresentados, a distribuição transversal de extensões apresenta valores máximos sobre o pilar, assim como para a mesma carga vertical aplicada se verificam menores extensões nas armaduras longitudinais dos modelos com reforço aderente em relação aos não aderente; comprovando a interdependência entre o aumento da carga vertical e a existência de maiores tensões sobre o pilar, o que origina as maiores extensões, quer numa direcção quer noutra, pelo início de perda de rigidez da laje devido à fendilhação. Por outro lado, é notória a diminuição das mesmas no seu afastamento em relação ao pico (zona de Pilar), devido à diminuição de esforços na laje entre o pilar e os bordos (zona de momentos nulos), ou seja, verifica-se um menor campo de tensões.

4.2.2 DESLOCAMENTOS VERTICAIS

Constatou-se, experimentalmente, que a introdução de parafusos de reforço pré-esforçados originou um incremento de rigidez nos modelos e, a sua utilização com injeção do seu espaço envolvente, do tipo aderente, proporcionou um comportamento mais dúctil. De facto, comparando o modelo de referência com os restantes modelos reforçados, observou-se que nestes os deslocamentos verticais são inferiores, para patamares de carga homólogos.

Pela observação das figuras das deformadas, pode-se constatar que as rotações se concentram sobretudo junto ao pilar, produzindo deformações plásticas, originadas pela forte fendilhação tangencial nesta zona. Este facto é tanto mais visível quanto maior for o valor da carga vertical aplicada. A deformação dos modelos pode ser comparada à deformação de um corpo rígido em torno de um eixo, que neste caso é, sensivelmente, o eixo do pilar.

Comparando o modelo de referência com os modelos aderentes e não aderentes verificamos que as deformadas diminuem com a introdução dos parafusos transversais (modelo R quando comparado com os restantes).

A introdução de resina, na ligação entre a laje e os parafusos, conduz a comportamentos bem distintos entre modelos.

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). Entre o modelo M8 e M8b, verifica-se que a influência da resina conduz a modelos mais dúcteis.

Foi possível constatar a relação entre o 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.

4.2.3 EVOLUÇÃO DA FORÇA NOS PARAFUSOS DE REFORÇO

A força instalada nos parafusos manteve-se sensivelmente constante nos patamares iniciais do carregamento, tendo-se registado incrementos acentuados da mesma nos patamares que antecedem a rotura nos modelos M6 e M8 (não aderentes), contrária aos modelos M6b e

M8b (aderentes), que após a fase inicial de carregamento iniciam uma solicitação gradual dos parafusos até ser atingida a rotura por punçoamento.

Em todos os modelos reforçados, os parafusos colocados na camada mais interior e junto ao pilar, apresentam uma força global média superior à dos parafusos colocados na camada mais exterior.

Nos modelos reforçados com ligação do tipo não aderente, foi possível recuperar os parafusos e verificar que vários se romperam no modelo M6 (11, no total, com diâmetro 6 mm), não se tendo verificado a rotura de nenhum no modelo M8 (diâmetro 8 mm)

Nos modelos do tipo aderente não foi possível a remoção global de todos os parafusos dada a sua ligação, mas verificou-se, visualmente, a rotura de todos os parafusos do modelo M6b, não tendo sido observada a rotura de nenhum parafuso no modelo M8b.

4.2.4 CARGAS E MODOS DE ROTURA AO PUNÇOAMENTO

Todos os modelos ensaiados apresentaram rotura por punçoamento. Nos modelos M6 e M6b, a rotura deu-se pelo interior do reforço. Nos modelos M8 e M8b, a superfície de rotura foi exterior ao reforço, intersectando a face em compressão já fora da área da laje que continha os parafusos de reforço.

A utilização de parafusos enquanto armadura transversal de reforço aumenta a ductilidade da conexão pilar-laje e altera o modo de rotura da laje, passando de uma rotura clara de punçoamento (modelo de referência) para uma rotura mista entre corte e flexão, mas mais próxima da flexão, especialmente nos modelos aderentes e ou com maior armadura transversal (M8 e M8b).

Experimentalmente, verificaram-se incrementos de resistência que variaram de 15 % a 42 % em relação a parafusos roscados de 6 mm e 8 mm, respectivamente. A existência de aderência entre os parafusos de reforço e a laje originou um melhor desempenho desta solução.

Em termos gerais, a melhor aproximação entre os resultados experimentais e os previstos é conseguida utilizando o EC2, considerando limitação no aço dos parafusos de reforço ao valor de $f_{sy,ef}$ e sem a limitação do factor de escala (k). Nesta situação a média do rácio V_{exp} / V_{Rm} é de 1.09, ligeiramente conservador (9 % acima do valor óptimo de 1.00). De uma maneira geral, o ACI 318 – 08 é um regulamento que apresentou resultados mais conservadores.

4.2.5 INCLINAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE ROTURA

A introdução de parafusos de reforço não aderentes origina um aumento da inclinação da superfície de rotura, em relação ao plano da laje. Este incremento é tanto maior quanto maior o diâmetro dos parafusos roscados. Obtiveram-se inclinações médias da superfície de rotura ao punçoamento que variam entre os 40 ° e 45 °, aproximadamente.

Se considerarmos a introdução dos parafusos de reforço, mas agora aderentes, verificamos que há uma ligeira diminuição da inclinação da superfície de rotura. Obtiveram-se inclinações médias da superfície de rotura ao punçoamento que variam entre os 35 ° e 39 °, aproximadamente.

Verifica-se, então, que quando o espaço em volta dos parafusos é injectado com resina epoxídica, o mecanismo de formação 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, melhorando a resistência da laje.

4.3 CONCLUSÕES FINAIS

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.

A utilização de parafusos pré-esforçados leva a uma redução dos deslocamentos da estrutura e confere maior monolitismo às ligações, conferindo igualmente maior ductilidade à ligação. Desta forma, pré-esforçando a laje transversalmente, junto às faces do pilar, é possível retardar e evitar a rotação e o alargamento da fenda inclinada, fenda essa necessária para a formação da superfície de rotura. O que conduz deste modo, a um incremento substancial na resistência das lajes ao punçoamento. Esta conclusão é fundamentada a partir dos ensaios, nos quais foram obtidas cargas últimas de 1.15 a 1.42 vezes superiores ao valor de carga última no modelo de referência (sem reforço transversal). Este incremento de carga permite maiores deformações antes de ocorrer a rotura da laje, aumentando desta forma a sua ductilidade na ligação pilar-laje.

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 aumenta a ductilidade da conexão pilar-laje e altera 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. Este fenómeno é possível constatar não só pelo modo de rotura dos modelos ensaiados e descritos no capítulo 2, como é facilmente

observado se tivermos em consideração os modelos descritos e ensaiados neste trabalho experimental.

A próxima figura ilustra a possível forma de rotura em lajes fungiformes sujeitas a um reforço ao punçoamento com armadura transversal. Estas roturas poderão ocorrer junto ao pilar, sendo interiores ao reforço (Figura 4.1 (a)), ao longo do reforço (Figura 4.1 (b)), exteriores ao reforço (Figura 4.1 (c)) ou ainda entre o reforço transversal (Figura 4.1(d)).

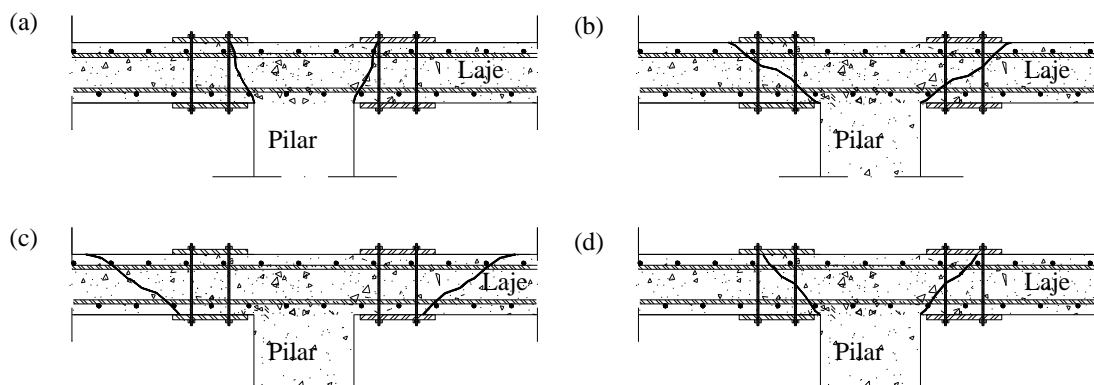


Figura 4.1 – Possível modo de rotura de lajes fungiformes quando sujeitas a reforço transversal

A forma de rotura dos modelos M6 e M6b em comparação com os modelos M8 e M8b, passou do interior do reforço para o seu exterior, tendo este fenómeno sido mais evidente quando comparado entre modelos aderentes e não aderentes.

Com a introdução de resinas epoxídicas, no espaço entre os parafusos e a laje, foi possível constatar que a forma de rotura dos modelos com menor armadura (parafusos M6) passou do interior do reforço (tipo (d) - modelo M6) para uma rotura ao longo deste (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).

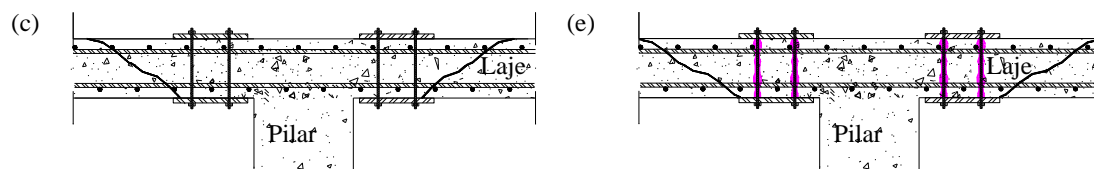


Figura 4.2 – Modo de rotura dos modelos M8 e M8b

4.4 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Foi intenção do autor contribuir com este trabalho para o esclarecimento de algumas questões relacionadas com o comportamento de lajes fungiformes maciças pré-esforçadas, quando submetidas a esforços de punçoamento. No entanto, e após a realização e conclusão do trabalho, será inevitável constatar a existência de inúmeras questões relacionadas que, quer por não serem objecto do trabalho, quer por não fazerem parte do seu enquadramento, não foi possível dar um esclarecimento cabal, ficando em aberto “a porta” para desenvolvimentos futuros. Deve, assim, a investigação nesta área prosseguir, com a realização de um maior número de ensaios e o desenvolvimento de melhores modelos analíticos e/ou numéricos, com o objectivo comum de fornecer respostas a múltiplas questões pendentes.

Enunciam-se alguns aspectos que seria interessante desenvolver num futuro próximo:

- *Efeito da relação entre o vão e a espessura da laje.* A utilização de relações l/h diferentes dá origem a diferentes relações entre os momentos flectores e a carga vertical actuantes;
- *Efeito da percentagem geométrica de armadura.* Nos modelos ensaiados ao longo deste trabalho, a quantidade de armadura ordinária utilizada foi sempre a mesma;
- *Efeito de um carregamento cíclico.* Utilização desta técnica, mas agora com carregamento cíclico, comparando-o com carregamento monotónico já realizado;
- *Utilização de CFRP ou GFRP em simultâneo com esta técnica;*
- *Efeito da variação do material utilizado na injeção.* Utilização desta técnica mas agora com injeção de outro tipo de material, estudando as alterações induzidas;
- *Efeito da dimensão do orifício onde é injectada o agente de ligação.* Utilização desta técnica mas agora com variação do diâmetro do orifício para o mesmo diâmetro dos parafusos, estudando as alterações induzidas;
- *Utilização desta técnica junto a pilares de bordo ou de canto;*
- *Utilização desta técnica na proximidade de buracos ou pequenas aberturas;*
- *Modelação numérica ou computacional* para possível comparação entre o verificado e o esperado;
- *Desenvolvimento de mais, eficazes e fiáveis, estudos analíticos e/ou numéricos* para permitir a execução de estudos paramétricos exaustivos de uma forma rápida e económica.

ANEXO

LEVANTAMENTO FOTOGRÁFICO DOS MODELOS ENSAIADOS

A. INTRODUÇÃO

Neste anexo apresentam-se algumas fotografias dos modelos.

Numa primeira fase, em fábrica, onde se procedeu à instrumentação, levantamento da altura útil e respectiva betonagem de todos os modelos ensaiados.

Numa segunda fase, serão apresentados desenhos representativos da localização de cortes e das inclinações da superfície observadas, juntamente com as fotografias dos modelos com ligação do tipo aderente (M6b e M8b) que ilustram o tipo de rotura ao punçoamento obtidas ao longo dos ensaios realizados.

Não serão apresentadas fotografias dos modelos não aderentes visto que este tipo de reforço já foi alvo de alguns estudos, não trazendo, portanto, nada de novo a acrescentar à informação já disponível.

Para localização de todos os cortes e inclinações das superfícies de rotura ao punçoamento utilizou-se o esquema apresentado nas figuras seguintes.



Figura I 1 – Instrumentação dos modelos



Figura I 2 – Medição e registo de altura útil dos modelos



Figura I 3 – Betonagem e vibração dos modelos

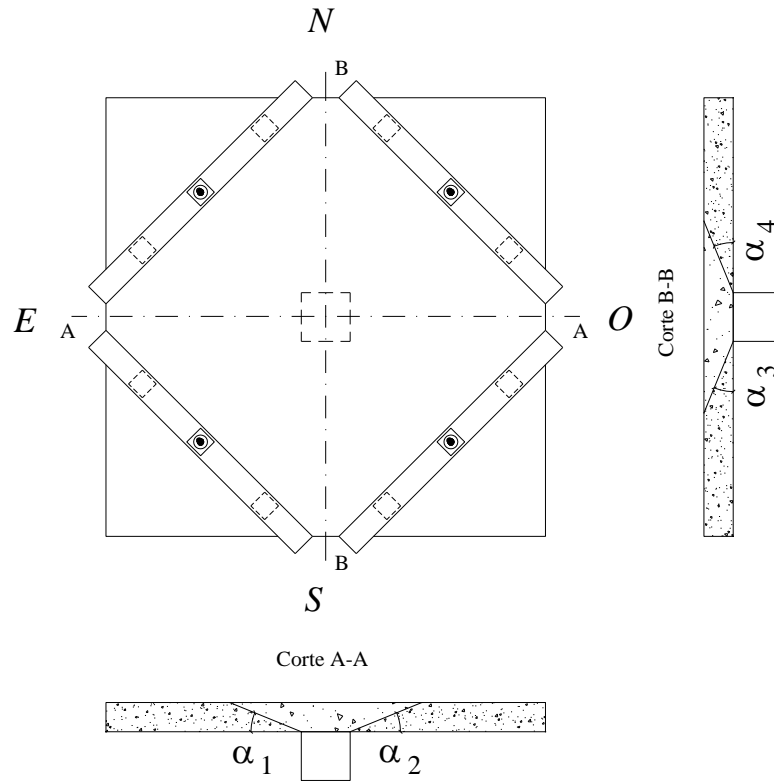


Figura I 4 - Localização de cortes e das inclinações da superfície observadas (Modelo M6b)

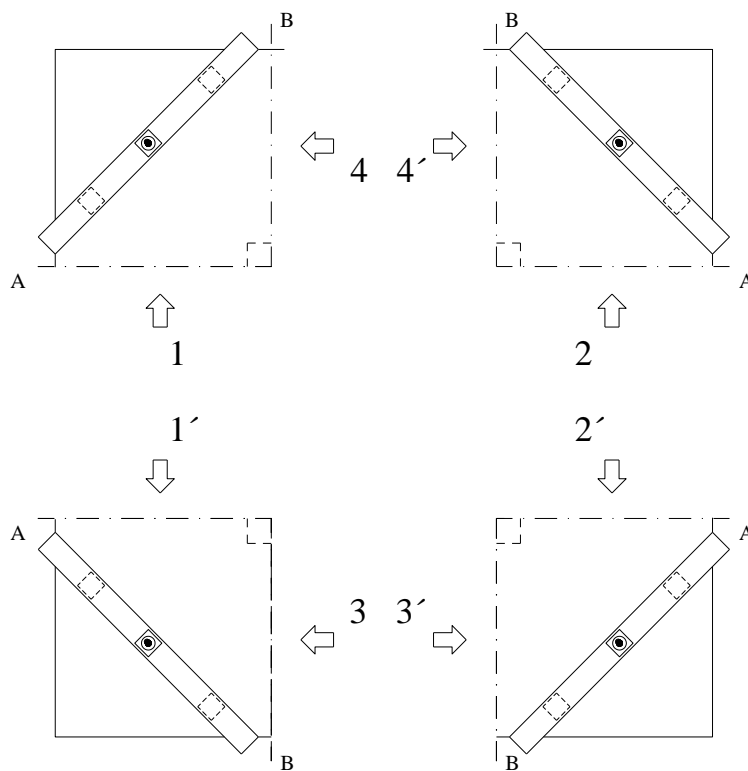
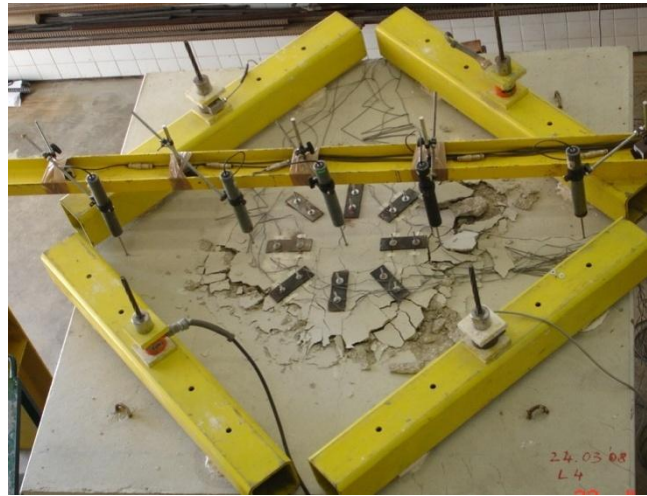


Figura I 5 - Localização das vistas apresentadas (Modelo M6b)

Modelo M6b

Planta



Vista 1 (α_1)



Vista 2 (α_2)



Vista 1+2 ($\alpha_1+\alpha_2$)



Vista 3 (α_3)



Vista 4 (α_4)



Vista 2' (α_2)



Vista 1' (α_1)



Vista 2'+1' ($\alpha_2+\alpha_1$)



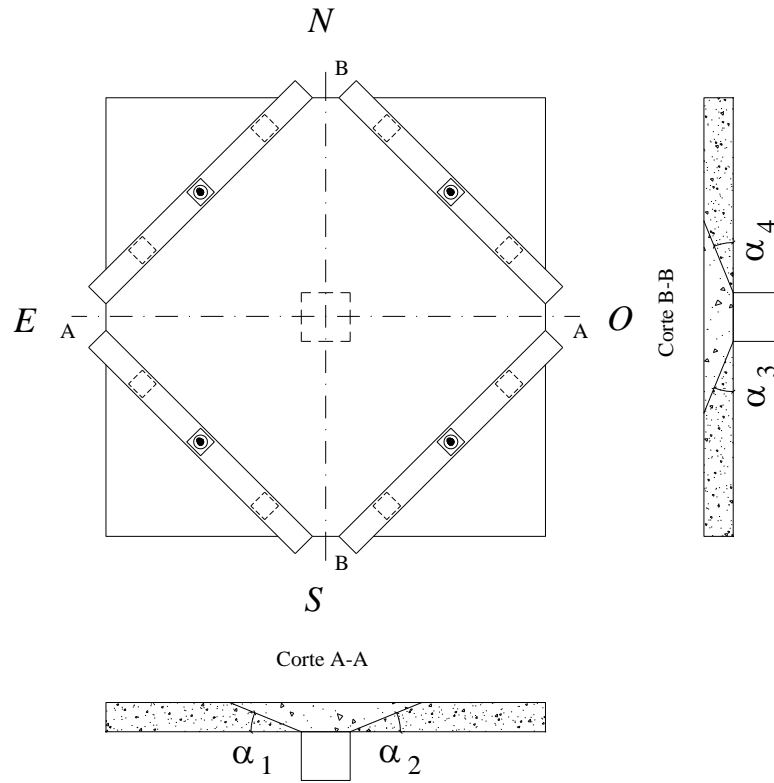


Figura I 6 - Localização de cortes e das inclinações da superfície observadas (Modelo M8b)

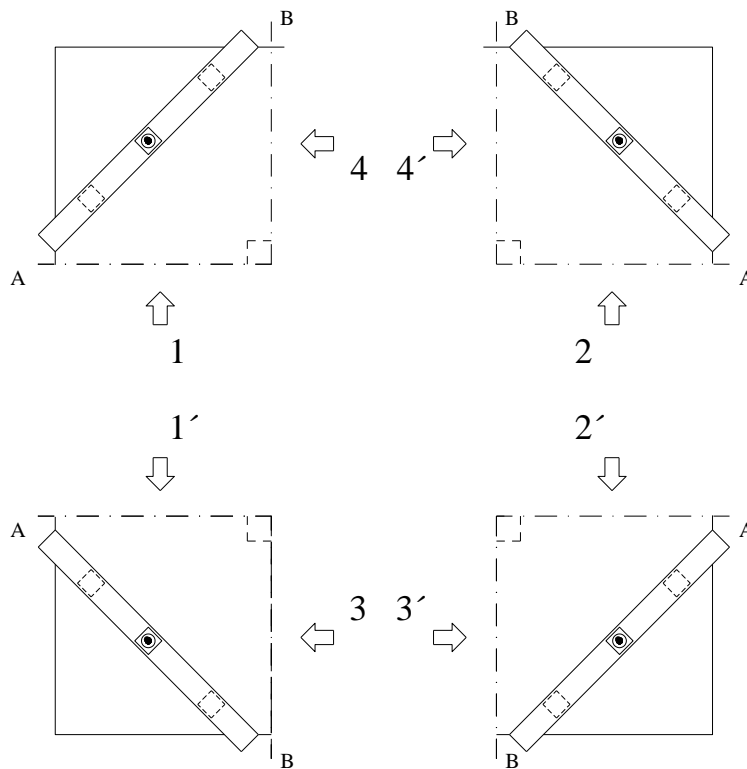


Figura I 7 - Localização das vistas apresentadas (Modelo M8b)

Modelo M8b

Planta



Vista 2' (α_2)



Vista 1' (α_1)



Vista 2'+1' ($\alpha_2+\alpha_1$)



Vista 3 (α_3)



Vista 4 (α_4)



Modelo M6b - Vista 1+4 ($\alpha_1+\alpha_4$)



Modelo M8b - Vista 2+3' ($\alpha_1+\alpha_4$)



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ACI Commitee, 318M-08,. *"Metric Building Cote Requirements for Structural Concrete & Commentary."*. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2008.
- [2] BETTOR MBT, PORTUGAL. *"sistemas MBrace - Fichas Técnicas"*. 2001.
- [3] Cánovas, M. F. *"Las Resinas Epóxi en la Construcción"*. 2º Edição. Madrid: Instituto Eduardo Torroja de la construcción y del Cemento, 1981.
- [4] CO.LLC, FYFE. *"Quality Control Manual for the Tyfo Fib Wrap System"*. Dezembro, 1999.
- [5] CORPORATION, MITSUBISHI CHEMICAL. *"Replark system- Material Properties & Standard applications Procedure"*. Novembro, 1997.
- [6] Duarte, I. *"Reparação e Reforço de Lajes Fungiformes ao Punçoamento"*, *Dissertação de Mestrado*. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2008.
- [7] Duarte, I., e A. M. Ramos. *"Strengthening of existng Flat Slabs with Transverse Reinforcement"*, *Proceedings of CCC 2008, challenges for Civil Constructions*. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [8] EC2. *"European Committe for Standarisation. EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-1 : General Rules for Buildings."*. CEN, 2004.
- [9] El-Salakawy, E., K. Soudki, e M. A. Polak. *"Punching Shear Behavior of Flat Slabs Strengthened with Fiber Reinforced Polymer Laminates"*. *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 2004.
- [10] EN, Comité Euro-International du béton. *"CEB - FIP Model Code 1990"*. Bulletin d'information nº 213-214, Maio, 1993.
- [11] EN, Fédération Internationale du Béton. *"Punching of structural Concrete Slabs"*. Lausanne: Bulletin 12, Technical Report Prepared by the CEB- FIP Task Group - Utilisation of Concrete in Design, Abril, 2001.
- [12] Faria, D. M., V. J. G Lúcio, e A. M. P. Ramos. *"Strengthening and Reinforced Concrete Flat Slabs using Post-tensioning with ancorages by bonding."* *FIB symposium - Concrete: 21st Century Superhero*. London, June, 2009.
- [13] Gardner, N., e H e Chung, L. Jungsuck. *"What Can We Learn from the Sampoong Department Store Collapse"*. Estocolmo: International Workshop on Punching Shear Capacity of RC Flat Slabs, Royal Institute of Technology, Department of Structural Engineering, Julho, 2000.

- [14] Ghali, A., M. A. Sargious, e A. Huizer. *"Vertical Prestressing of Flat Slabs Around Columns"*, *Shear in Reinforced Concrete*, ACI, Special Publication SP42. Detroit, 1974.
- [15] Gomes, J. M, e A. M. Ramos. *"Estudo Experimental do Punçamento em Lajes Reforçadas com Armadura Transversal Aderente Pós-Instalada."* Encontro Nacional de Betão Estrutural 2010. Lisboa, 10, 11 e 12 Novembro, 2010.
- [16] Guandalini, S. *"Poinçonnement symétrique des dalles en béton armé"*, Tese de doutoramento. Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2005.
- [17] Harajili, M. H., K. A. Soudki, e T. Kudsi. *"Strengthening of Interior slab-Column Connections Using a Combination of FRP Sheets and Steel Bolts"*. Journal of Composites for Construction, ASCE, 2006.
- [18] HILTI. *"Artigo de Revista "Ingeniería - Refuerzo de Techos Planos"*.
- [19] Imagem. *"Colapso de uma Garagem subterrânea em Gretzenbach"*. Gretzenbach: http://ibeton.epfl.ch/recherche/armpoinconnement/default_e.asp, 2004.
- [20] Imagens. *"Centro Comercial Sampoong"*. Sampoong, Séul Coreia: www.google.pt/imagens (sampoong), 1995.
- [21] IPQ, NP EN 10002-1. *"Materiais metálicos. Ensaio à Tracção Parte 1 : Método de Ensaio à Temperatura Ambiente."*. Lisboa: (Instituto Português de Qualidade), 2006.
- [22] IPQ, NP EN 12390-1. *"Ensaio do Betão Endurecido - Forma, dimensões e outros requisitos para o Ensaio de Provetes e para os Moldes."*. Lisboa: (Instituto Português de Qualidade), 2003.
- [23] IPQ, NP EN 12390-2. *"Ensaio do Betão Endurecido - Execução e Cura dos provetes para ensaios de resistência."*. Lisboa: (Instituto Português de Qualidade), 2003.
- [24] IPQ, NP EN 12390-3. *"Ensaio do Betão Endurecido - Resistência à compressão dos provetes de ensaio."*. Lisboa: (Instituto Português de Qualidade), 2003.
- [25] Kunz, J. *"Refuerzo de Techos Planos"*. Liechtenstein: The Magazine of HILTI Group, 2007.
- [26] Luís, M. *"Punçamento Cíclico de Lajes Fungiformes Reforçadas com Pré-esforço Transversal"*, *Dissertação de Mestrado*. 2010: Universidade Nova de Lisboa, Faculdade Ciências e Tecnologia.
- [27] Luís, M., e A. M. Ramos. *"Estudo Experimental do Punçamento Cíclico em Lajes Fungiformes Reforçadas com Pré-esforço Transversal"*. Guimarães: BE2008 - Encontro Nacional de Betão Estrutural 2008, 2008.

- [28] Menétrey, P. *"Numerical Analysis of Punching Failure in Reinforced Concrete Structures"*, *Thèse de Doctorat n° 1279*. Lausanne: Ecole Polytechnic Fédérale de Lausanne, 1994.
- [29] Menétrey, P. *"Analytical Computation of the Punching Strength of Reinforced Concrete"*. Detroit: ACI Structural Journal, 1996.
- [30] Ménétrety, P., e E. Bruhwiler. *"Shear Strengthening of Existing Reinforced Concrete Slabs Under Concentrated Loads"*. Lausanne: Ecole Polytechnic Fédérale de Lausanne, Département de Génie civil, 1996.
- [31] Moe, J. *"Shearing Strength of Reinforced Concrete Slabs and Footings Under Concentrated Loads"*, *Bulletin D47, Research and Development Laboratories*. Protland: Portland Cement Association, Stokie, 1961.
- [32] Mowrer, R. D., e M. D. Vanderbilt. *"Shear Strength of Lightweight Agregate Reinforced Concret Flat Plates"*. J. Am. Concrete Intitute, 1967.
- [33] Muttoni, A., e M. Fernández Ruiz. *"Applications of the critical shear crack theory to punching of R/C slabs with transverse reinforcement"*. Vol. 10. ACI structural Journal, 2008.
- [34] Muttoni, A., e Miguel Fernández Ruiz. *"Performance and design of punching shear reinforcing systems"*. 3rd fib International Congress, 2010.
- [35] Muttoni, A., e Stefan Lips. *" Experimental investigation of reinforced concrete slabs with punching shear reinforcement"*. Lyngby, Denmark: 8th fib PhD Symposium in Kgs, 2010.
- [36] Ramos, A. M. *"Reparação e Reforço de Lajes Fungiformes ao Punçoamento"*, *Dissertação de Mestrado*. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 1995.
- [37] Ramos, A. M., e V. e Regan, P. Lúcio. *"Repair and Strengthening Methods of Flat slabs for Punching"*, *International workshop on Punching shear Capacity of RC Flat Slabs*. Estocolmo: Department of Structural Engineering, 2000.
- [38] Ramos, A. M., e V. Lúcio. *"Técnicas de Reparação e Reforço ao Punçoamento"*, *Documento Técnico n°4/96*. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Instituto da Construção, 1996.
- [39] REBAP. *"Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado"*. Porto: Lopes da Silva Editora, 1983.
- [40] Reforço e Reparação de Estruturas de Betão Armado, Apontamentos da cadeira de Reforço , FCT-UNL. *"Técnicas de Reforço e Reparação de Estruturas de B.A."*. FCT-UNL, 2006.

- [41] RILEM, TC113/CPT-PC-5. *"Method of Tests for Compressive Strength of Polymer Concrete and Mortar"*.
- [42] RILEM, TC113/PCM-8. *"Method of Test for Flexural Strength and Deflection of Polymer Mortar"*.
- [43] Rodrigues, C. C. *"Reparação e Reforço de Estruturas de Betão Armado com sistemas Compósitos de FRP"*. Lisboa, 2005.
- [44] SAI-262. *Concrete structures*. Zurich, 2003.
- [45] Talbot, A. N. *"Reinforced concrete Wall Footings and Column footings"*, *Engineering Experiment Station, Bulletin n° 67*. University of Illinois, 1913.
- [46] Wood, J. *"Piper Row Car Park, wolverhampton, Quantitative Study of the Causes of the Partial Collapse on 20th March 1997"*, *Health and Safety Executive Report*. Reino Unido, 2008.