

PUNÇOAMENTO EM LAJES REFORÇADAS COM ARMADURA TRANSVERSAL ADERENTE PÓS-INSTALADA

2.^a Conferência
Construção e Reabilitação Sustentável
de Edifícios no Espaço Lusófono

RESUMO

Estudo experimental 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. Foram executados e ensaiados cinco modelos. Quatro destes, reforçados com a introdução de parafusos roscados verticais pré-esforçados; dois com ligação do tipo não aderente (M6 e M8) e os outros dois aderente (M6b e M8b). O restante foi utilizado como modelo de referência (R).

OBJECTIVO

Verificar as alterações de comportamento, modo de rotura e carga última experimental entre ensaios aderentes e não aderentes.

DESCRIÇÃO DOS MODELOS

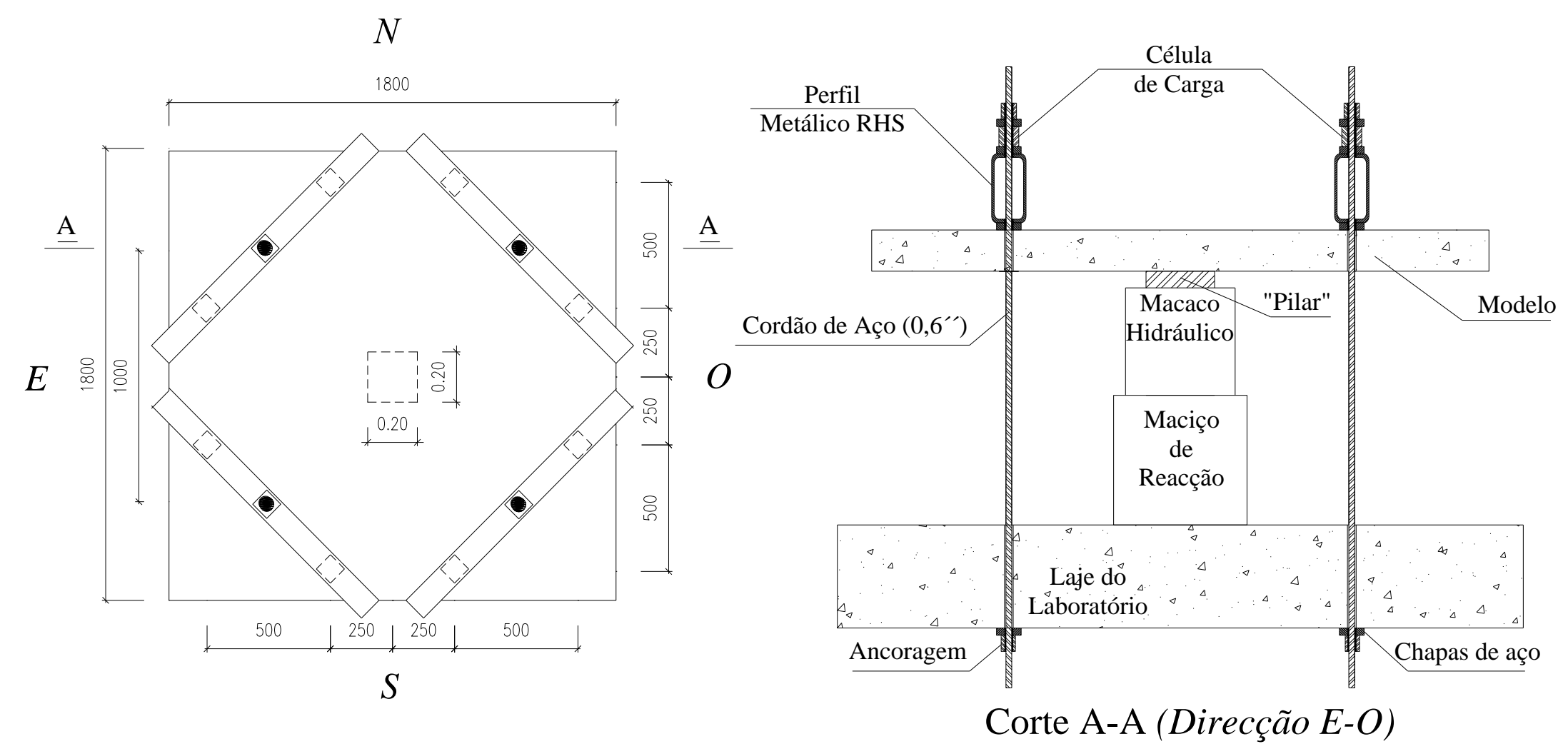


Fig.1 – Definição geométrica dos modelos (mm)

- Armadura superior # Ø10/0.075 m e inferior # Ø6/0.20 m;
- Recobrimento de aproximadamente 20 mm na face superior e 10 mm na face inferior;
- Pilar central materializado por uma placa de aço com dimensões 200x200x50 mm³, sendo o carregamento realizado por intermédio de um macaco hidráulico (ENERPAC RRH 1006) localizado sob a mesma;
- Os modelos simulam exclusivamente a área de laje junto ao pilar, limitada pelas linhas de inflexão, onde os momentos flectores são nulos.
- Foram usados parafusos roscados M6 e M8, ancorados a chapas de aço, com forças médias iniciais de aperto de 2.9 kN nos modelos M6 e M6b (parafuso M6), e 6.7 kN nos modelos M8 e M8b (parafuso M8).

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Quadro 1 – Propriedades mecânicas do betão

| Modelo | f _{cm} [MPa] | f _{cm} [MPa] | E _m [GPa] | Dias |
|--------|-----------------------|-----------------------|----------------------|------|
| R | 49.2 | 39.3 | 28.9 | 65 |
| M6 | 59.6 | 47.7 | 30.8 | 99 |
| M8 | 59.7 | 47.7 | 30.8 | 99 |
| M6b | 45.9 | 36.7 | 28.2 | 395 |
| M8b | 47.1 | 37.7 | 28.4 | 407 |

Quadro 2 – Caracterização do aço das armaduras longitudinais e dos parafusos de reforço.

| Aço | Ø6 | Ø10 | M6 | M8 |
|---|-----|-----|-----|-----|
| f _{yk} / σ _{yk,2} [MPa] | 588 | 445 | 416 | 523 |
| f _{yk} / σ _{yk} [MPa] | 697 | 697 | 478 | 603 |

Nota: f_{yk} – tensão de cedência do aço; f_{yk,2} – tensão de rotura do aço; σ_{yk,2} – tensão limite convencional de proporcionalidade a 0.2% do aço; σ_{yk} – tensão de rotura à tração média dos parafusos.

Quadro 3 – Tensão média e respectiva extensão da resina epoxi

| f _{pc,m} [MPa] | ε _{pc,m} [%] | f _{pc,m} [MPa] | ε _{pc,m} [%] |
|-------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|
| 49.1 | 2.39 | 108.8 | 4.60 |

Nota: f_{pc,m} – tensão média de tração por flexão; ε_{pc,m} – extensão correspondente à tensão de rotura à tração por flexão; f_{pc,m} – tensão de rotura à compressão; ε_{pc,m} – extensão correspondente à tensão de rotura à compressão.

DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

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, do tipo M6 e M8, dispostos em duas camadas em torno do pilar, tal como se pode observar na Fig.2 e Fig. 3, sendo posteriormente pré-esforçados com um valor pré-definido. Em dois dos modelos foi utilizado uma resina epóxi para garantir aderência entre os parafusos de reforço e a laje (modelos M6b e M8b) (Fig.4 e Fig. 5).

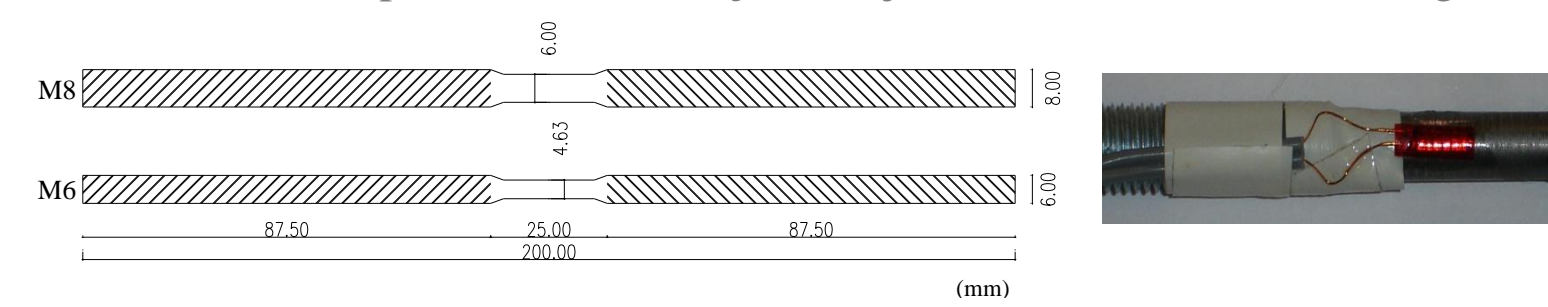


Fig.2 – Geometria dos Parafusos de reforço e exemplo de um parafuso instrumentado



Fig.4 – Aspecto geral de um dos modelos antes e depois do reforço



Fig.5 – Aspecto geral do reforço de um dos modelos antes da aplicação da resina – Vista Superior e Inferior.

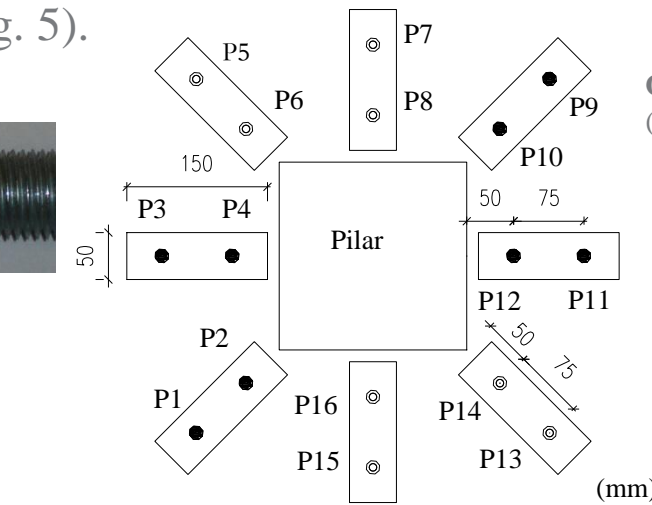


Fig.3 – Definição geométrica do reforço



Fig.6 – Aspecto geral do reforço de um dos modelos durante a aplicação da resina – Vista Superior e Inferior.

VALORES EXPERIMENTAIS NORMALIZADOS

Quadro 4 – Valores Experimentais Normalizados

| Modelo | f _{cm} [MPa] | V _{exp} [kN] | V _{norm} [kN] | V _{norm} /V _{ref} |
|--------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------------------|
| R | 39.3 | 269 | 275 | 1.00 |
| M6 | 47.7 | 331 | 317 | 1.15 |
| M8 | 47.7 | 380 | 364 | 1.32 |
| M6b | 36.7 | 374 | 391 | 1.42 |
| M8b | 37.7 | 365 | 378 | 1.37 |

Observando o Quadro 4, constatamos incrementos de resistência substanciais nos modelos reforçados, especialmente nos modelos com ligação do tipo aderente. Nos modelos não aderentes variou de 15% (M6) a 32% (M8), enquanto que nos modelos aderentes variou de 37% (M8b) a 42% (M6b). A existência de aderência entre os parafusos de reforço e a laje, contribuiu para um melhor desempenho desta solução.

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

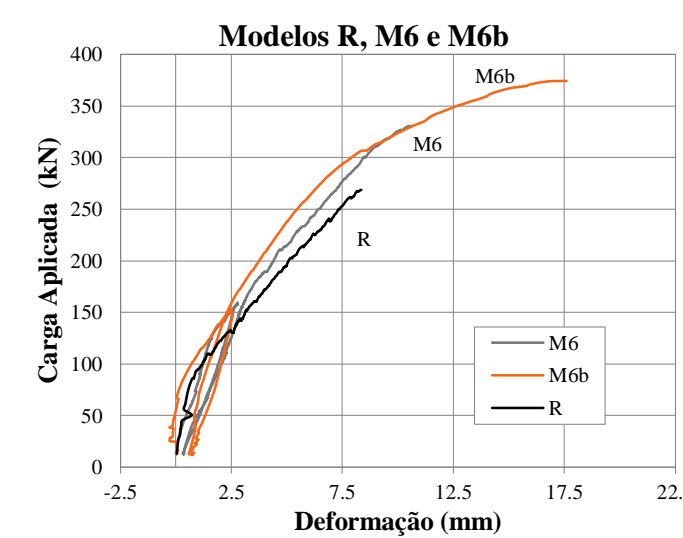


Fig.7 – Evolução dos deslocamentos verticais com a carga vertical aplicada nos modelos R, M6 e M6b a uma distância de 750 mm do centro, na direcção "E-O"

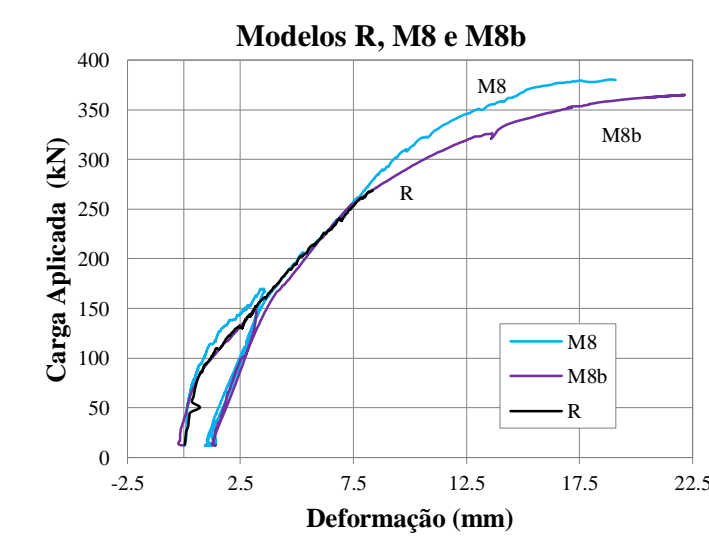


Fig.8 – Evolução dos deslocamentos verticais com a carga vertical aplicada nos modelos R, M6 e M6b a uma distância de 750 mm do centro, na direcção "E-O"

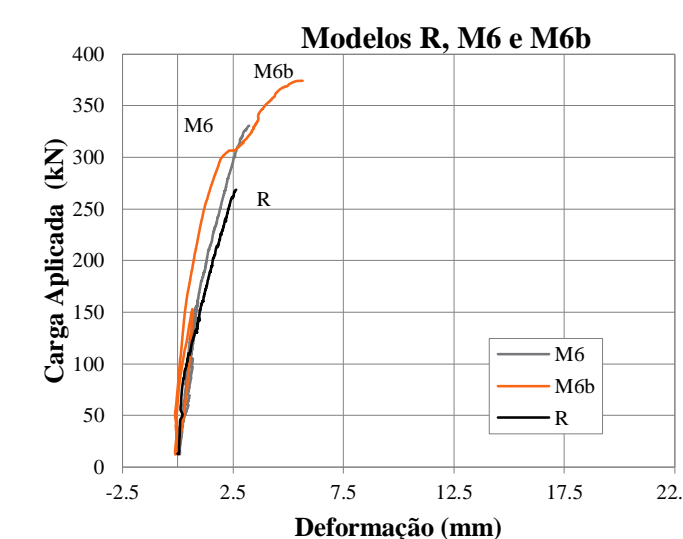


Fig.9 – Evolução dos deslocamentos verticais com a carga vertical aplicada nos modelos R, M6 e M6b a uma distância de 300 mm do centro, na direcção "E-O"

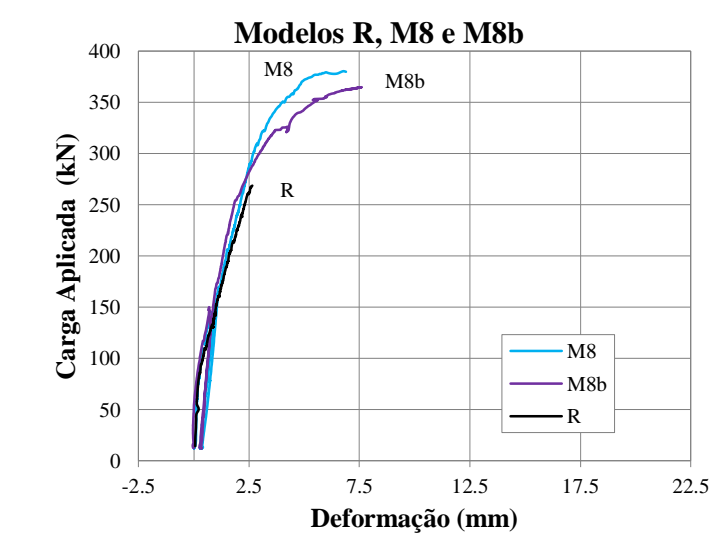


Fig.10 – Evolução dos deslocamentos verticais com a carga vertical aplicada nos modelos R, M6 e M6b a uma distância de 300 mm do centro, na direcção "E-O"

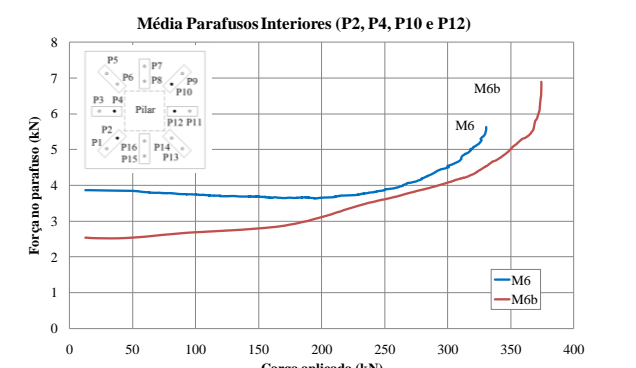


Fig.11 – Evolução da força média nos parafusos Interiores e Exteriores dos modelos

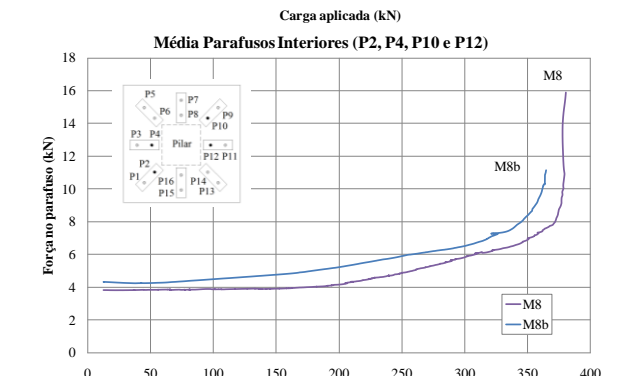
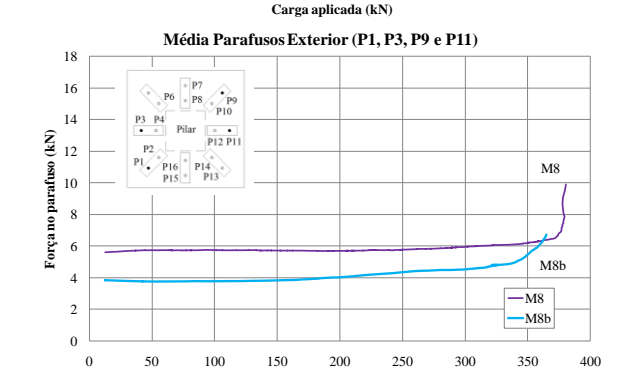
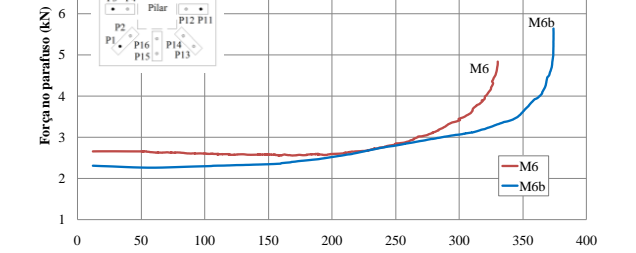


Fig.11 – Evolução da força média nos parafusos Interiores e Exteriores dos modelos

- 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 tração (Fig.12), 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 (Fig.13 e Fig.17).
- O modelo M8 (Fig.14), 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 (Fig.17).
- Nos modelos em que os parafusos de reforço eram aderentes (M6b e M8b), as superfícies de rotura foram idênticas às dos modelos análogos não aderentes, isto é, rotura pelo interior do reforço no modelo M6b (Fig.15) e exterior ao reforço no modelo M8b (Fig.16).



Fig.12 – Vista superior e inferior do modelo de Referência (R) após rotura



Fig.13 – Vista superior e inferior do modelo M6 após rotura



Fig.14 – Vista superior e inferior do modelos M8 após rotura

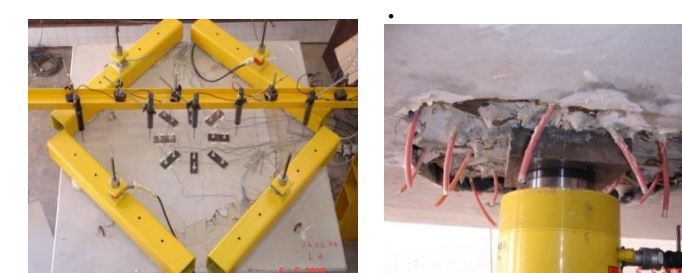


Fig.15 – Vista superior e inferior do modelo M6b após rotura



Fig.16 – Vista superior e inferior do modelo M8b após rotura



Fig.17 – Pormenor dos parafusos depois de rotura por punção nos Modelos M6 a M8

COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E OS PREVISTOS NOS REGULAMENTOS

Quadro 5 – Comparação entre as cargas de rotura experimentais e previstas segundo EC2 (Resultados sem limitação da tensão no aço dos parafusos e sem limitação de k)

| Modelo | K | ρ _f [%] | u [m] | u* [m] | V _{Rm,1} [kN] | V _{Rm,2} [kN] | V _{Rm,3} [kN] | V _{exp} [kN] | V _{exp} /V _{Rm} |
|--------|------|--------------------|-------|--------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| R | 2.51 | 1.20 | 1.895 | - | 270 | - | - | 269 | 1.00 |
| M6 | 2.49 | 1.17 | 1.925 | 2.660 | 296 | 334 | 408 | 331 | 0.99 |
| M8 | 2.49 | 1.16 | 1.935 | 2.670 | 298 | 460 | 411 | 380 | 0.93 |
| M6b | 2.46 | 1.11 | 1.983 | 2.714 | 284 | 325 | 389 | 374 | 1.15 |
| M8b | 2.45 | 1.10 | 1.993 | 2.716 | 289 | 454 | 394 | 365 | 0.93 |

Quadro 6 – Comparação entre as cargas de rotura experimentais e previstas segundo EC2 (Resultados com limitação da tensão no aço dos parafusos e sem limitação de k)

| Modelo | K | ρ _f [%] | u [m] | u* [m] | V _{Rm,1} [kN] | V _{Rm,2} [kN] | V _{Rm,3} [kN] | V _{exp} [kN] | V _{exp} /V _{Rm} |
|--------|------|--------------------|-------|--------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| R | 2.51 | 1.20 | 1.895 | - | 270 | - | - | 269 | 1.00 |
| M6 | 2.49 | 1.17 | 1.925 | 2.660 | 296 | 306 | 408 | 331 | 1.08 |
| M8 | 2.49 | 1.16 | 1.935 | 2.670 | 298 | 366 | 412 | 380 | 1.04 |
| M6b | 2.46 | 1.11 | 1.983 | 2.714 | 284 | 298 | 390 | 374 | 1.25 |
| M8b | 2.45 | 1.10 | 1.993 | 2.716 | 289 | 359 | 394 | 365 | 1.02 |

Quadro 7 – Comparação entre as cargas de rotura experimentais e previstas segundo EC2 (Resultados com limitação da tensão no aço dos parafusos e com limitação de k)

| Modelo | K | ρ _f [%] | u [m] | u* [m] | V _{Rm,1} [kN] | V _{Rm,2} [kN] | V _{Rm,3} [kN] | V _{exp} [kN] | V _{exp} /V _{Rm} |
|--------|------|--------------------|-------|--------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| R | 2.00 | 1.20 | 1.895 | - | 215 | - | - | 269 | 1.25 |
| M6 | 2.00 | 1.17 | 1.925 | 2.660 | 237 | 262 | 328 | 331 | 1.26 |
| M8 | 2.00 | 1.16 | 1.935 | 2.670 | 240 | 321 | 331 | 380 | 1.18 |
| M6b | 2.00 | 1.11 | 1.983 | 2.714 | 231 | 258 | 317 | 374 | 1.45 |
| M8b | 2.00 | 1.10 | 1.993 | 2.716 | 236 | 319 | 321 | 365 | 1.14 |

Quadro 8 – Resultados obtidos pelo ACI 318 - 08

| Modelo | d [mm] | u [m] | u* [m] | V _{Rm,1} [kN] | V _{Rm,2} [kN] | V _{Rm,3} [kN] | V _{exp} [kN] | V _{exp} /V _{Rm} |
|--------|--------|-------|--------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| R | 87.1 | 1.149 | - | 209 | - | - | 269 | 1.29 |
| M6 | 89.5 | 1.158 | 1.846 | 239 | 231 | 375 | 331 | 1.43 |
| M8 | 90.3 | 1.161 | 1.849 | 241 | 357 | 380 | 380 | 1.06 |
| M6b | 94.1 | 1.176 | 1.829 | 223 | 224 | 348 | 374 | 1.67 |
| M8b | 94.9 | 1.180 | 1.829 | 229 | 351 | 355 | 365 | 1.04 |

Nota: k – factor de escala; ρ_f – percentagem geométrica de armadura de flexão; u, u* – perímetro do contorno de referência; V_{Rm,1} – valor médio do esforço resistente ao punçamento sem armaduras específicas; V_{Rm,2} – valor médio do esforço resistente ao punçamento com armaduras específicas; V_{Rm,3} – valor médio do esforço resistente ao punçamento, caso a rotura ocorra fora do perímetro do reforço; V_{exp} – valor da carga de rotura experimental; V_{norm} – valor médio do esforço resistente ao punçamento.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso deste técnica simples, económica e de rápida execução, aumenta significativamente a resistência das lajes ao punçamento, 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.

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_{yk,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.

TRABALHO REALIZADO COM O APOIO DE:

Os ensaios descritos neste artigo foram realizados no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. A esta instituição agradecemos os meios colocados à disposição. Este trabalho recebeu ainda apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia – Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior através do Projecto PTDC/ECM/114492/2009. Manifestamos igualmente reconhecimento à Concremat, S.A. e HILTI pelo seu contributo à realização destes ensaios através da fabricação dos modelos ensaiados resinas, respectivamente.