

REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE EDIFÍCIOS COM PÓS-ESFORÇO

Lúcio, Válder¹, Faria, Duarte²; Ramos, António³; Ferreira, João⁴

1: Universidade NOVA de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia
Departamento de Engenharia Civil; vlucio@fct.unl.pt

2: Universidade NOVA de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia
Departamento de Engenharia Civil; atualmente bolsheiro de pós-doutoramento
na École Polytechnique Fédérale de Lausanne; duamvf@gmail.com

3: Universidade NOVA de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia
Departamento de Engenharia Civil; ampr@fct.unl.pt

4: Versor - Consultas Estudos e Projectos. Lda; Lisboa; versor.proj@gmail.com

PALAVRAS-CHAVE: reabilitação estrutural; edifícios; pós-esforço; estruturas de lajes fungiformes; reabilitação sísmica de edifícios

RESUMO

No reforço de edifícios com estrutura de betão armado podem ser usadas diferentes soluções, devendo o projetista selecionar a mais eficiente em função das anomalias existentes e das condicionantes técnicas, económicas e funcionais de cada caso particular.

O reforço com pós-esforço, como o termo indica, introduz esforços na estrutura que diminuem os esforços já instalados e reduz os efeitos das cargas que são posteriormente aplicadas na estrutura. Desta forma, o reforço com pós-esforço é ativo, isto é, não é efetivo apenas para as cargas aplicadas na estrutura após o reforço mas também é eficiente para as ações já instaladas. Este sistema de reforço não altera a resistência dos elementos estruturais mas altera o modo com as cargas são encaminhadas para os apoios da estrutura, criando caminhos alternativos tanto para as cargas já instaladas como para as que são instaladas posteriormente, reduzindo assim os efeitos das cargas na estrutura existente (esforços internos, deformações, fendilhação e vibrações).

Nesta comunicação são apresentadas soluções de reforço com cordões de aço de alta resistência tensionados contra os elementos estruturais, e soluções com recurso a estruturas metálicas pré-esforçadas contra a estrutura a reforçar. São apresentados trabalhos de investigação para o desenvolvimento destes sistemas de reforço e exemplos de aplicação em estruturas reais.

1. INTRODUÇÃO

De entre as múltiplas opções de reforço de estruturas de betão armado, o projetista deve escolher a que é mais eficiente tendo em conta: as anomalias existentes na estrutura, as condicionantes técnicas e económicas e as condições de funcionamento da construção após e durante os trabalhos de reforço.

O reforço de uma estrutura pode ter como objetivo exclusivamente o aumento da resistência dos elementos estruturais, podendo nesse caso ser adicionadas armaduras (de aço, fibras de carbono ou de vidro, etc.) ou betão (encamisamento com betão armado e/ou reforçado com fibras), incrementando também a rigidez do elemento estrutural [1]. Outras soluções de reforço incluem a alteração do sistema

estrutural existente, com a adição de novos elementos (novos pilares, paredes resistentes para as ações horizontais, etc.) e/ou com a adição de pós-esforço na estrutura [2].

As anomalias estruturais mais frequentes em edifícios de betão armado estão relacionadas com insuficiente capacidade resistente para a flexão em vigas e lajes, flexão composta com esforço axial em pilares e paredes, esforço transverso, punçamento em lajes fungiformes (Figura 1), etc.. As anomalias podem também estar relacionadas com erros na pormenorização das armaduras, insuficiente comprimento destas para a transferência das forças ao betão por aderência, falta de cintagem do betão e de armaduras comprimidos, insuficiente ductilidade da estrutura para as ações sísmicas, redução da secção resistente das armaduras e delaminação do betão por corrosão destas, etc.. Estes fenómenos podem causar roturas localizadas ou o colapso progressivo da estrutura (Figuras 2 e 3), com graves custos materiais e de vidas humanas.



Figura 1: Rotura por punçamento de uma laje fungiforme.



Figura 2: Colapso progressivo de um edifício de laje fungiforme durante a sua construção.



Figura 3: Colapso de um edifício de laje fungiforme causado pela ação sísmica (Northridge, Los Angeles -1994).

Existem outras situações que, embora não coloquem em risco a segurança da estrutura e das pessoas, condicionam o funcionamento dos edifícios, a sua utilização e a sua durabilidade. São exemplos a excessiva deformabilidade de lajes e vigas, a qual provoca danos nos elementos não estruturais (Figura 4.a) com comportamento frágil (paredes divisórias, pavimentos, envidraçados, etc.), e a fendilhação com abertura excessiva em elementos de betão armado (Figura 4.b). A reduzida rigidez da

estrutura pode também causar vibrações incômodas aos utilizadores, com consequências psicológicas diversas (receio na utilização da estrutura, pânico, náuseas e tonturas).



Figura 4: (a) Fendas em paredes divisórias por deformação excessiva da estrutura e (b) fenda com grande abertura numa laje de betão armado.

Estas anomalias têm origem na fase de projeto, durante a execução da obra e/ou na fase de utilização. Na fase de projeto da estrutura surgem frequentemente erros de conceção, de modelação e dimensionamento da estrutura e também erros de pormenorização. Durante a construção é corrente surgirem erros nas dimensões dos elementos estruturais, no posicionamento das armaduras e na qualidade dos materiais (Figura 5), etc..

Durante a utilização dos edifícios é por vezes necessário realizar alterações na estrutura (Figura 6.a), o que não deve ser feito sem o acompanhamento do projetista (execução de aberturas em lajes para atravessamento por condutas, corte parcial ou total de pilares, etc.) ou alteração da sua funcionalidade, com aumento das cargas em relação às consideradas no projeto. Outra causa de danos são as ações acidentais, como o impacto de veículos em pilares, explosões de gás ou ataques terroristas (Figura 6.b).



Figura 5: Armadura superior com recobrimento excessivo (reduzida altura útil) em laje fungiforme, e betão com resistência inferior à especificada no projeto.

As soluções de reforço disponíveis podem ser classificadas em dois tipos distintos:

- as soluções passivas, tais como a adição de armaduras, encamisamento com betão e a alteração do sistema estrutural [1, 2], eficientes fundamentalmente para a segurança aos estados limites últimos pois o reforço apenas entra em funcionamento para as ações aplicadas após a sua execução;

- as soluções ativas, como a utilização de pós-esforço [2, 3, 4], caso em que são introduzidos na estrutura esforços, ou deslocamentos, que contrariam os já instalados na estrutura e os que serão aplicados após a execução do reforço.



(a)



(b)

Figura 6: (a) Execução de abertura numa laje de betão armado e (b) colapso devido a ataque terrorista.

Os sistemas ativos reduzem os efeitos de todas as ações aplicadas à estrutura, quer as que são introduzidas antes quer as posteriores à entrada em funcionamento do reforço. Assim, são mais eficientes para a segurança aos estados limites de utilização do que os sistemas passivos e reduzem a necessidade de aliviar as cargas aplicadas à estrutura para a execução do reforço.

Nas secções seguintes apresentam-se duas soluções de reforço por pós-esforço, um utilizando cordões de aço de alta resistência ancorados por aderência à estrutura e um outro através da alteração do sistema estrutural, com a adição de uma nova estrutura em aço, que reduz os vãos da estrutura existente e é pré-esforçada contra esta reduzindo as deformações excessivas presentes.

2. REFORÇO POR PÓS-ESFORÇO

O sistema de reforço por pós-esforço não altera a resistência dos elementos estruturais mas altera o modo como as cargas são encaminhadas para os apoios, criando caminhos alternativos tanto para as cargas já instaladas como para as que são instaladas posteriormente, reduzindo assim os efeitos das cargas na estrutura existente (esforços internos, deformações, fendilhação e vibrações).

Por outro lado, esta alteração de esforços nos elementos estruturais pode ser dirigida no sentido de aumentar a ductilidade destes elementos e a resistência para a ação sísmica [4], assim como o recentramento da estrutura, isto é, a redução das deformações plásticas residuais após o sismo [4, 5]. Estes efeitos podem ser obtidos com a utilização de cabos de pré-esforço que reduzem os momentos fletores devido às ações verticais, deixando mais resistência disponível para a ação sísmica, aumentam o esforço axial do elemento proporcionando-lhe maior resistência à flexão e introduzem forças capazes de reduzir as deformações plásticas das armaduras solicitadas pelo sismo.

O reforço por pós-esforço da estrutura pode ser aplicado com cordões, fios ou barras aço de alta resistência, ou laminados de carbono, ou ainda com perfis de aço pré-esforçados contra a estrutura de betão.

3. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

3.1 Reforço por pós-esforço com perfis de aço

O reforço com recurso a perfis de aço está ilustrado na Figura 7, onde se mostra uma viga de betão reforçada com uma viga de aço colocada em paralelo. Na Figura 7.a mostra-se o reforço sem pós-esforço, em que a viga de reforço funcionará em paralelo com a viga de betão recebendo através das ligações uma parcela da carga aplicada após a instalação do reforço. Esta parcela será proporcional à razão entre a rigidez da viga de aço e a rigidez do conjunto. Na Figura 7.b o reforço é ativo, isto é, a viga metálica é pré-esforçada contra a viga de betão, a qual fica, assim, pós-esforçada. Para tal, são introduzidos deslocamentos na viga de betão para cima, afastando-a da viga de aço, reduzindo os deslocamentos existentes e transferindo para a viga de aço algumas das cargas presentes aquando do reforço. A viga de aço fica assim sujeita a uma maior carga na fase de utilização do que no caso da Figura 7.a. Esta solução de reforço é mais eficiente do que a anterior, especialmente em relação aos estados limites de deformação e de fendilhação. Para efeitos de estados limites de resistência, admitindo que ambos os sistemas são suficientemente dúcteis, ambos terão a mesma capacidade de carga.

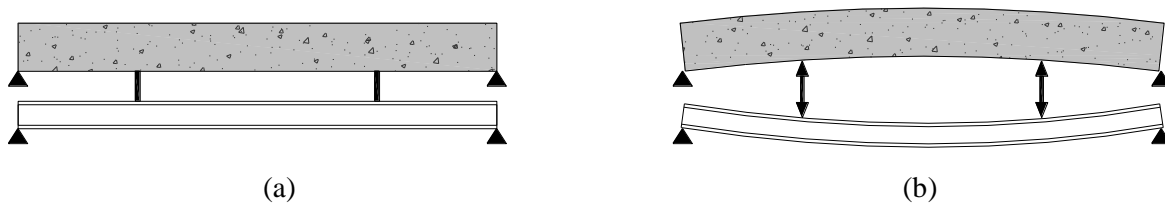


Figura 7: Reforço com perfis metálicos (a) sem pós-esforço (b) com pós-esforço.

Na Figura 8 mostra-se a aplicação do sistema esquematizado na Figura 7.b ao reforço de uma laje fungiforme [2]. Neste exemplo a viga metálica é apoiada em consolas curtas fixas com buchas aos pilares do edifício. Os deslocamentos, para aplicação do pós-esforço na laje, são impostos através de varões roscados e porcas que são enroscadas com o auxílio de uma chave dinamométrica. Os deslocamentos são medidos na viga de aço com um comparador e, com base na medição dos deslocamentos e na rigidez da viga de aço, é possível estimar a força instalada na laje e os esforços correspondentes.



Figura 8: (a) Reforço de uma laje fungiforme com pós-esforço usando uma viga de aço; (b) sistema de imposição dos deslocamentos a terços do vão, com varões roscados e porcas.

Um sistema semelhante foi utilizado no reforço de um dos edifícios do Quartel dos Bombeiros Voluntários da Trafaria [2] (Figura 9.a). O edifício, construído em 1996, possui dois pisos com estrutura original de betão armado em laje fungiforme maciça. O piso térreo é o estacionamento dos veículos de socorro e o piso superior é usado para serviços administrativos e formação. Devido a erros de conceção e de análise estrutural o edifício encontrava-se em risco de ruína. O edifício possuía uma malha de pilares aproximadamente quadrada com 10 m de vão e uma laje fungiforme maciça com 0.25 m de espessura, o que corresponde a uma esbelteza de $h/L = 1/40$, que é excessiva para este tipo de estrutura. Em fase de projeto a laje foi analisada como se de uma laje vigada se tratasse, isto é, apenas foi considerada, para efeitos de equilíbrio com os esforços internos, metade da carga especificada nas normas. A Figura 9.b mostra um exemplo da fendilhação que as paredes de alvenaria do piso superior apresentavam devido à deformabilidade da laje.

As condicionantes para a definição da solução de reforço a adotar para o edifício eram, sobretudo, as seguintes: manter o espaço necessário ao estacionamento dos veículos de socorro; reduzir ao mínimo a intervenção, nomeadamente nos acabamentos do piso superior, e o custo global da obra; conferir à estrutura a segurança necessária em relação ao punçoamento, flexão, deformação da laje, e a segurança para as ações sísmicas, tendo em conta a importância do edifício em caso de sismo.



Figura 9: (a) Vista do alçado principal do edifício dos Bombeiros Voluntários da Trafaria; (b) Fendilhação das paredes de alvenaria devido à deformação da laje.

A solução adotada incluiu o reforço das fundações, a construção de um sistema resistente aos sismos constituído por quatro paredes resistentes em betão armado e a execução de uma estrutura porticada em aço, para apoio das lajes do piso superior e da cobertura, como mostra a Figura 10.a. Estes pórticos são afastados entre si 3,30 m e suportam a laje a terços do vão, reduzindo os vãos da laje para aproximadamente $3,30 \times 3,30 \text{ m}^2$. As lajes foram pós-esforçadas pelas vigas dos pórticos metálicos, impondo deslocamentos por enroscamento de porcas em varões roscados, tal como no exemplo anterior (Figura 8.b).

3.2 Pós-esforço com cordões de aço

Para o reforço por pós-esforço com cordões de aço de alta resistência foi desenvolvido um sistema de ancoragem por aderência com recurso a um agente de aderência [6]. Este sistema de ancoragem foi estudado em laboratório [7] para determinar o comprimento de ancoragem necessário face às forças envolvidas, às propriedades do agente de aderência e do betão, e às características da superfície dos cordões. O sistema foi posteriormente aplicado ao reforço de lajes fungiformes [3] com os objetivos de aumentar a sua capacidade resistente à flexão e ao punçoamento e, em simultâneo, melhorar o

comportamento em serviço reduzindo as deformações e a fendilhação. Esta técnica de reforço mostrou-se também muito eficiente no aumento da resistência das lajes após a rotura [8, 9], permitindo a sua utilização reduzir o risco de colapso progressivo, bastante comum neste tipo estrutural (Figuras 2 e 3).



Figura 10: (a) Pórticos em perfis de aço para reforço da laje do teto do piso térreo; (b) vista dos pórticos após a colocação da proteção ao fogo em gesso cartonado.

O sistema de reforço consiste [3] em: introduzir cordões de aço de alta resistência em furos inclinados previamente executados na laje junto ao perímetro do pilar, aplicar pré-esforço nos cordões com equipamento próprio do sistema, injetar os furos com o agente de aderência e cura do mesmo, libertar o pré-esforço e transferir as forças para a laje (Figura 11) e, finalmente, cortar as extremidades dos cordões. Foi realizada uma campanha experimental em que foram ensaiadas cinco lajes com $2300 \times 2300 \text{ mm}^2$ em planta com 100 mm (lajes DF2 e DF3) e 120 mm (lajes DF5, DF6 e DF7) de espessura, sem armadura específica de punçoamento, com pré-esforço bidireccional (DF7) e unidireccional (restantes lajes). Na Figura 12 mostra-se o sistema aplicado a duas lajes ensaiadas e o seu aspeto após a rotura. Na Figura 12.c é possível observar a superfície de rotura por punçoamento e o sistema de resistência pós-rotura, o qual depende, quase exclusivamente, da resistência dos cordões e das suas ancoragens ao betão.

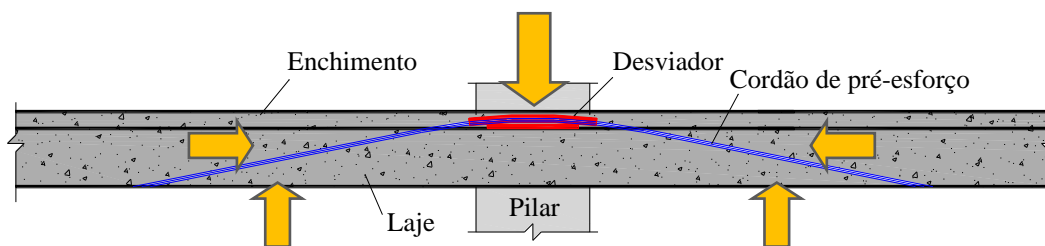


Figura 11: Sistema de reforço por pós-esforço com ancoragens por aderência.

Na Figura 13 apresenta-se a capacidade de carga de cada uma das lajes, normalizada à resistência de uma laje não reforçada com igual espessura (lajes DF1 e DF4). Como se pode observar, com este sistema foi possível aumentar a capacidade de carga em 40% e 50% da resistência da laje não reforçada, para as lajes com 100 mm e 120mm de espessura, respetivamente.

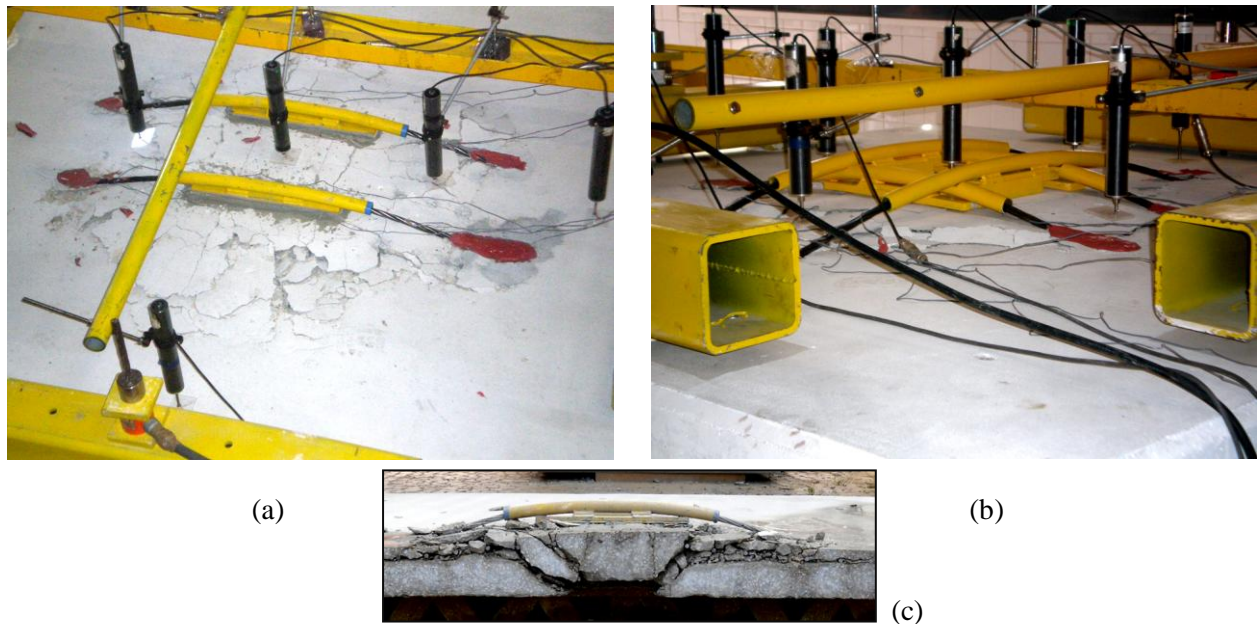


Figura 12: Rotura das lajes (a) DF6 e (b) DF7; (c) superfície de rotura por punção e mecanismo de resistência após a rotura (vista de uma secção da laje).

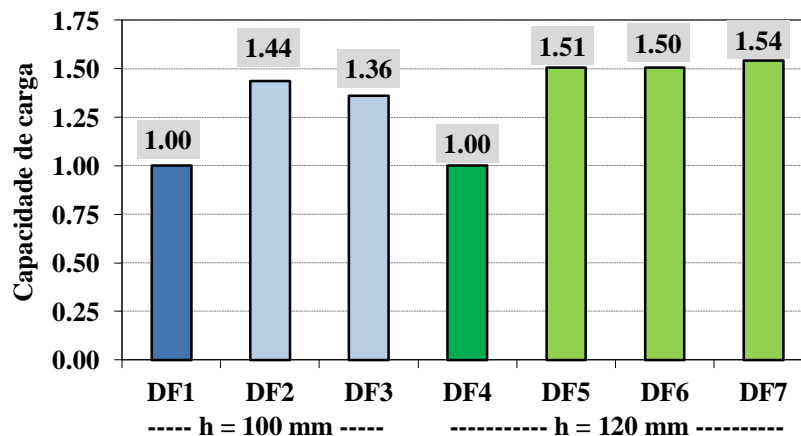


Figura 13: Capacidade de carga das lajes, normalizada para a resistência das lajes de referência (DF1 e DF4).

4. CONCLUSÕES

Com os sistemas de reforço por pós-esforço é possível impor deslocamentos na estrutura existente que conduzem a uma redução das deformações e da fendilhação instaladas. Assim, esta solução de reforço, para além de contribuir para o aumento da capacidade de carga da estrutura (segurança aos estados limites últimos), contribui também para a segurança aos estados limites de utilização. Para os sistemas referidos, o mecanismo de aumento da capacidade de carga dos sistemas de reforço por pós-esforço não consiste no aumento de resistência dos elementos a reforçar mas sim em encaminhar para os apoios uma parcela das cargas aplicadas, antes e depois do reforço, através de um sistema alternativo. Este sistema alternativo pode ser uma estrutura metálica colocada paralelamente à estrutura existente ou um conjunto de cordões, fios ou barras de aço de alta resistência.

Os sistemas de reforço por pós-esforço da estrutura são, assim, uma solução alternativa aos restantes sistemas de reforço, com vantagens significativas nalguns casos, nomeadamente em relação à segurança aos estados limites de utilização.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia - Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior através de uma bolsa de doutoramento número SFRH/BD/37538/2007 e do Projeto PTDC/ECM/114492/2009. Os autores agradecem à Concremat pela execução dos modelos em betão armado, à HILTI Portugal pelo adesivo HIT RE-500 e pelo equipamento de furação e à VSL pelos cordões de pré-esforço.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ramos, A.P.; Lúcio, V.J.G.; “Repair and Strengthening Methods of Flat Slabs for Punching”; International Workshop on Punching Shear Capacity of RC flat Slabs; Royal Institute of Technology; Estocolmo, Junho de 2000.
- [2] Ferreira, J. M. T.; Reforço de Estruturas de Betão Armado por Alteração do Sistema Estrutural; Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil (Estruturas e Geotecnia), Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa, Dezembro de 2012.
- [3] Faria, D.V.; Lúcio, V.J.G; Ramos, A.M.P.; Strengthening of flat slabs with post-tensioning using anchorages by bonding; Engineering Structures, Elsevier; Volume 33, Issue 6, June 2011, pp. 2025–2043; <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.02.039>.
- [4] Gião, R.; Lúcio, V.; Chastre, C.; Seismic strengthening of RC beam-column connections; 15WCEE - 15th World Conference on Earthquake Engineering; Lisboa, 2012.
- [5] Marreiros, R.; Lúcio, V.; Pampanin, S.; Behaviour of structural angles for rocking hybrid ductile concrete wall systems; fib Symposium 2013; Tel-Aviv, 2013.
- [6] Sistema de pós-tensão com ancoragens por aderência para estruturas de betão – patente Nacional INPI – Instituto Nacional de Protecção Industrial nº PAT 103 785, pedido em 12/07/2007, concedido em 14/04/2009.
- [7] Faria, D.V.; Lúcio, V.J.G; Ramos, A.M.P.; Pull-out and push-in tests of bonded steel strands; Magazine of Concrete Research, Thomas Telford; Magazine of Concrete Research, Volume 63, Issue 9, 01 September 2011, pp. 689 -705; www.icevirtuallibrary.com/content/article/10.1680/mac.2011.63.9.689
- [8] Faria, D.V.; Lúcio, V.J.G; Ramos, A.M.P.; Post-punching behaviour of flat slabs strengthened with a new technique using post-tensioning; Engineering Structures, Elsevier, Volume 40, July 2012, pp. 383-397; <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.03.014>.
- [9] Ramos, A. M. P.; Lúcio, V.; Post-Punching Behaviour of Prestressed Concrete Flat Slabs. Magazine of Concrete Research, Volume: 60, Issue: 4, pp. 245 – 251; Thomas Telford, Maio de 2008. <http://www.icevirtuallibrary.com/content/article/10.1680/mac.2008.60.4.245>.