a

Reforço ao punçoamento de lajes fungiformes com lâmina complementar de betão

Punching strengthening of flat slabs with overlaid reinforced concrete

Hugo Fernandes
Válter Lúcio
António Ramos

Resumo

A aplicação de uma nova camada de betão na face tracionada é uma solução de reforço económica e eficiente, em serviço e para estados limites últimos de resistência ao punçoamento e à flexão. O elevado gradiente de tensões na zona de punçoamento, juntamente com o carácter frágil de uma rotura desta natureza, aumenta o risco de descolamento da nova camada de betão de reforço. Este aspeto onera a importância das armaduras que cruzam a interface entre as duas camadas de betão, e que garantem a transmissão das forças entre camadas e a integridade estrutural. Este trabalho visa apresentar o estudo experimental realizado sobre modelos de laje fungiforme reforçados com uma nova camada de betão na face superior, a comparação dos resultados com diversas normas em vigor e a validação de um modelo numérico com base nos resultados experimentais, com recurso ao software de análise não-linear ATENA 3D®.

Abstract

Applying a new reinforced concrete layer overlaid on the tensile face is an economic and efficient strengthening solution for both serviceability and ultimate limit state of flat slabs. The high stress gradient at the supports, along with the brittle nature of the punching phenomenon, can affect the debonding of the new layer. Such behaviour exacerbates the role of the interface reinforcement responsible for stress transfer and the structural integrity of the strengthened element. This work presents the experimental campaign of slab specimens strengthened with overlaid RC, with comparison to current design codes, and validation of a numerical model implemented with nonlinear analysis software ATENA 3D®.

Palavras-chave: Reforço de lajes ao punçoamento / Betão armado / Aderência betão-betão / Análise experimental / Modelação numérica

Keywords: Punching strengthening / Reinforced concrete / Concrete-to-concrete bond / Experimental analysis / Numerical modelling

Hugo Fernandes

Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade Nova de Lisboa
Caparica, Portugal
hdpfernandes@fct.unl.pt

Válter Lúcio

CERIS/ICIST, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade Nova de Lisboa
Caparica, Portugal
vjgl@fct.unl.pt

António Ramos

CERIS/ICIST, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade Nova de Lisboa
Caparica, Portugal
ampr@fct.unl.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

FERNANDES, H. [*et al.*] – Reforço ao punçoamento de lajes fungiformes com lâmina complementar de betão. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 5. ISSN 2183-8488. (novembro 2017) 63-72.

1 Introdução

O uso alargado de lajes fungiformes como solução construtiva em estruturas levou a que se desenvolvessem métodos de reforço estrutural e/ou reabilitação do espaço para uma finalidade diferente da projetada inicialmente. As técnicas de reforço mais comuns da ligação laje-pilar consistem na construção de capitéis na face inferior da laje, em betão armado em estrutura de aço, colocação de armadura de punçoamento "pós-instalada" atravessando a espessura da laje na vertical ou inclinada, reforço das armaduras longitudinais superiores com chapas de aço ou fibras de carbono coladas na face superior, ou na adição de uma camada de betão armado na face superior da laje *concrete overlay*, com (Figura 1(a)) ou sem (Figura 1 (b)) aumento da espessura da laje. Esta camada de betão inclui uma malha de armaduras longitudinais que contribui para um aumento da resistência à flexão e ao punçoamento.

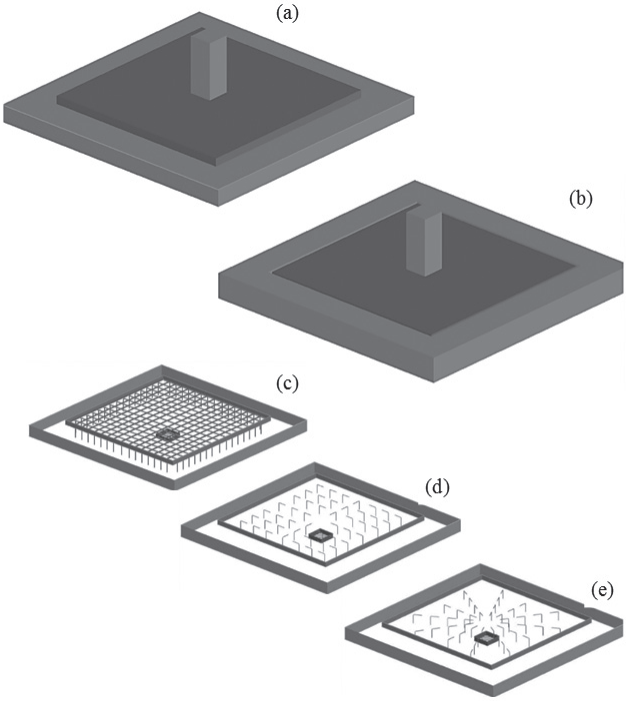

Figura 1 Aplicação da nova camada de betão e armadura da ligação betão-betão

A vantagem prática da solução que consiste na adição de uma camada de betão armado na face superior da laje reside na utilização de materiais compatíveis com a base existente e cuja aplicação na face superior da laje existente é simples, do ponto de vista da preparação da superfície, da montagem da armadura e da betonagem, e ainda porque dispensa cofragem e escoramento. De modo a garantir que as armaduras da nova camada de betão sejam eficientes para efeitos do reforço ao punçoamento, a área de reforço deve compreender, no mínimo, os limites da superfície de rotura por punçoamento, adicionados do comprimento de ancoragem das armaduras longitudinais. Estas podem inclusive ser ancoradas na laje existente, como ilustrado na Figura 1 (c), funcionando

como armadura que cruza a interface entre os dois betões. As tensões geradas na interface entre os dois betões, particularmente na extremidade da camada de betão de reforço, podem causar o descolamento do *overlay* [1]. A ancoragem da extremidade das armaduras longitudinais no betão de base permite controlar a abertura da interface.

O requisito mais importante a verificar na aplicação desta técnica de reforço é a boa interação da ligação betão-betão, para que, por aderência, seja garantida a transmissão de esforços entre camadas. O comportamento e a capacidade resistente desta ligação tem sido analisado em soluções de reforço de estruturas, com ênfase na interface entre camadas [2, 3], dado que esta pode condicionar o comportamento de toda a estrutura. Dado que o mecanismo resistente que garante a integridade da interface é a aderência entre camadas, a rotura da ligação por descolamento da nova camada de betão deve ser controlada de modo a evitar uma rotura frágil [4]. O comportamento da ligação deve então ser melhorado, recorrendo, para além da ancoragem da extremidade da armadura longitudinal, a armadura pós-instalada cruzando a interface (ferrolhos). Uma superfície rugosa ou muito rugosa é a preparação recomendada para a superfície da estrutura existente, dado que promove o interbloqueamento das duas camadas e solicita as armaduras que cruzam a interface. Os ferrolhos devem ser distribuídos na interface, como ilustrado na Figura 1 (d) e (e). A pormenorização destas armaduras pode ainda ser combinada com a pormenorização de armadura específica de punçoamento.

Para a análise numérica que se apresenta neste trabalho foram contabilizados os parâmetros que caracterizam a interface, bem como as armaduras que a cruzam e o modo como estão ancoradas. A rigidez da interface é o principal parâmetro que condiciona o descolamento das camadas. A mesma está diretamente relacionada com a energia de fratura da ligação e com a resistência à tração do betão menos resistente. A rotura da interface pode ser modelada com o critério de Mohr-Coulomb com tração truncada [5]. Este limite condiciona a aderência da interface e permite determinar parâmetros relevantes das superfícies em contacto tais como a coesão e o coeficiente de atrito da ligação.

2 Programa experimental

2.1 Definição dos modelos experimentais

O programa experimental realizado para analisar a *performance* desta técnica de reforço consistiu no ensaio de quatro lajes fungiformes à escala reduzida reforçadas com uma nova camada de betão na face superior da ligação pilar-laje:

SQ-REF – modelo de referência apenas com preparação de superfície e nova camada de betão, sem armadura a cruzar a interface;

SQ-STC – modelo com ferrolhos distribuídos na interface, ancorados com *grout* 80 mm na laje do substrato;

SQ-ANC – modelo com as armaduras longitudinais ancoradas com *grout* 80 mm na zona limite da nova camada de betão;

SQ-STANC – modelo que combina todas as características anteriores.

As dimensões dos modelos de laje à escala reduzida compreenderam uma camada de substrato com uma área de 2300 x 2300 mm^2 e 150 mm de espessura, armadas com varões de 16 mm de diâmetro espaçados de 100 mm em cada direção, como ilustrado na Figura 2 (a). Estes modelos foram reforçados com uma nova camada de betão aplicada na face superior do substrato, com uma área de 1700 x x 1700 mm^2 e 60 mm de espessura, armada com pares de varões de 10 mm, também espaçados de 100 mm em cada direção (Figura 2 (b)). Estas dimensões permitiram uma área de reforço suficiente para a ancoragem das armaduras longitudinais fora da superfície de rotura por punçoamento, um recobrimento e espaçamento mínimo até à superfície do substrato, que garantem a aderência das armaduras ao betão.

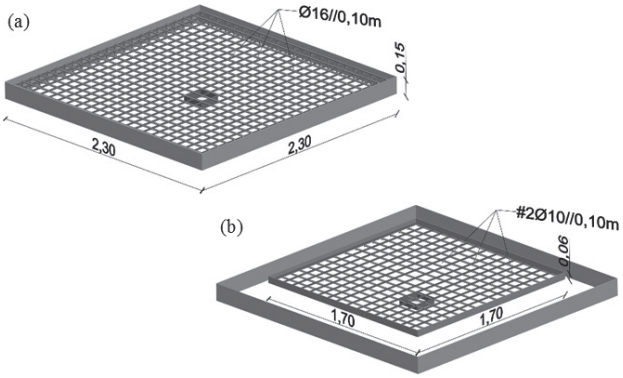

Figura 2 Geometria e pormenorização das armaduras longitudinais dos substratos (a) e da camada de reforço (b)

A preparação da superfície do substrato foi realizada com recurso a martelo elétrico e ponteiro de aço, com a preocupação de não exceder os 10 mm de profundidade, protegendo as armaduras longitudinais do substrato. Esta técnica confere à superfície uma rugosidade elevada, não obstante a consequente fendilhação resultante da percussão do martelo. A rugosidade da superfície de contacto é um dos principais fatores na aderência betão-betão, responsável pela adesão, interbloqueamento e solicitação das armaduras que a cruzam [6, 7]. Pretendia-se com esta preparação uma rugosidade média de cerca de 3,0 mm, característica de superfícies rugosas a muito rugosas, desejável na ligação entre betões de diferentes idades.

2.2 Sistema de ensaio

O sistema utilizado nos ensaios monotónicos de punçoamento, ilustrado na Figura 3, consistiu no carregamento centrado dos modelos de laje através de um macaco hidráulico com capacidade para 1000 kN. No contacto deste com a laje recorreu-se a chapa metálica com 200 x 200 mm^2, tendo as condições de fronteira cinemáticas sido garantidas por oito chapas com 100 x 100 mm^2, dispostas tangencialmente na linha teórica de momentos nulos (Figura 3 (a)).

A transmissão da carga para a laje de reação do laboratório foi realizada por um sistema de cordões de aço e varões de aço de alta resistência, com 15,2 mm e 40 mm respetivamente, entrepostos

por perfis compostos com 220 mm de altura. A carga foi medida com recurso a oito células de carga com 200 kN de capacidade e a deformação dos modelos medida com recurso a defletómetros com 100 mm de curso, exceto na linha de momentos nulos onde se recorreu a defletómetros com 50 mm de curso para medição do deslocamento. O deslocamento horizontal relativo entre as duas camadas de betão foi registado com defletómetros com 50 mm de curso. As extensões nos varões, de ambas as camadas, próximos dos eixos foram calculadas com recurso a extensómetros. A aquisição de dados foi realizada com o *dataloggers* HBM® Spider8 e UPM100, e o *software* Catman V6.0.

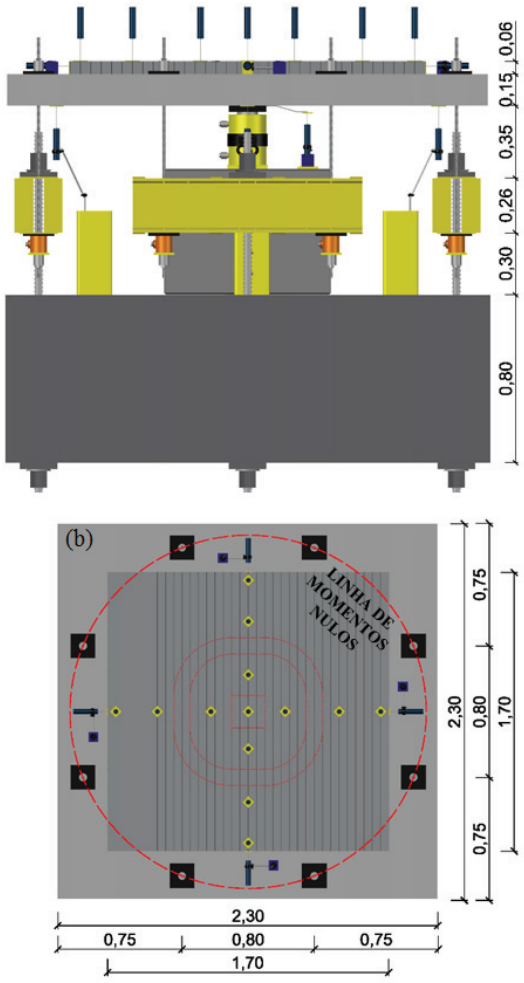

Figura 3 Esquema do sistema de ensaio de punçoamento centrado

2.3 Caracterização dos materiais

Foram realizados ensaios para caracterização dos materiais constituintes dos modelos: armadura longitudinal, betões das duas camadas, *grout* utilizado de ancoragem da armadura que cruza a interface, e resistência à tração da ligação betão-betão. As resistências à compressão ($f_{c,cub}$) e à tração por compressão diametral ($f_{t,sp}$) foram avaliadas para os betões das duas camadas. A resistência à tração da ligação ($\sigma_{pull-off}$) foi avaliada através de ensaios de arrancamento de prismas de betão com dimensões 150 x 150 x 60 mm³. Os resultados são apresentados no Quadro I.

Quadro I Resistência à compressão, aderência da ligação betão-betão, e tração por compressão diametral

[MPa]		SQ-REF	SQ-STC	SQ-ANC	SQ-STANC
Substrato	$f_{c,cub}$	32,8	26,4	34,8	25,6
	$f_{t,sp}$	2,9	2,6	3,0	2,3
Interface	$\sigma_{pull-off}$	0,85	1,04	0,82	0,80
Overlay	$f_{c,cub}$	36,9	34,3	37,2	39,3
	$f_{t,sp}$	2,9	3,2	2,6	2,8

A resistência à compressão e à tração por flexão do *grout* para ancoragem das armaduras que cruzam a interface foram aferidas em provetes com dimensões 40 x 40 x 160 mm³. A tensão de aderência na ancoragem de armaduras foi aferida através do ensaio de arrancamento de varões com o mesmo comprimento de ancoragem dos aplicados nos modelos de laje (80 mm), em furos com pelo menos o dobro do diâmetro dos varões. Resultaram então os valores de 78,8 MPa e 9,7 MPa, respetivamente para as resistências à compressão e tração por flexão do *grout*, e 16,2 MPa para a tensão de aderência na ancoragem de armaduras.

2.4 Modos de rotura dos modelos experimentais

Os modos de rotura dos modelos consistiram no descolamento da camada de reforço para as lajes SQ REF e SQ-ANC, com posterior punçoamento. No modelo SQ-REF a rotura por punçoamento ocorreu apenas no substrato, enquanto no modelo SQ-ANC a rotura por punçoamento ocorreu nas duas camadas em conjunto, como mostra a Figura 4.

Nos modelos SQ-STC e SQ-STANC, os ferrolhos distribuídos na interface permitiram que não houvesse o descolamento da camada de reforço até à rotura por punçoamento, como mostra a Figura 5. Note-se que o dano observado na face superior dos modelos não atingiu as extremidades da camada de reforço.

Figura 4 Rotura e pormenor da interface dos modelos SQ-REF (esquerda) e SQ-ANC (direita)

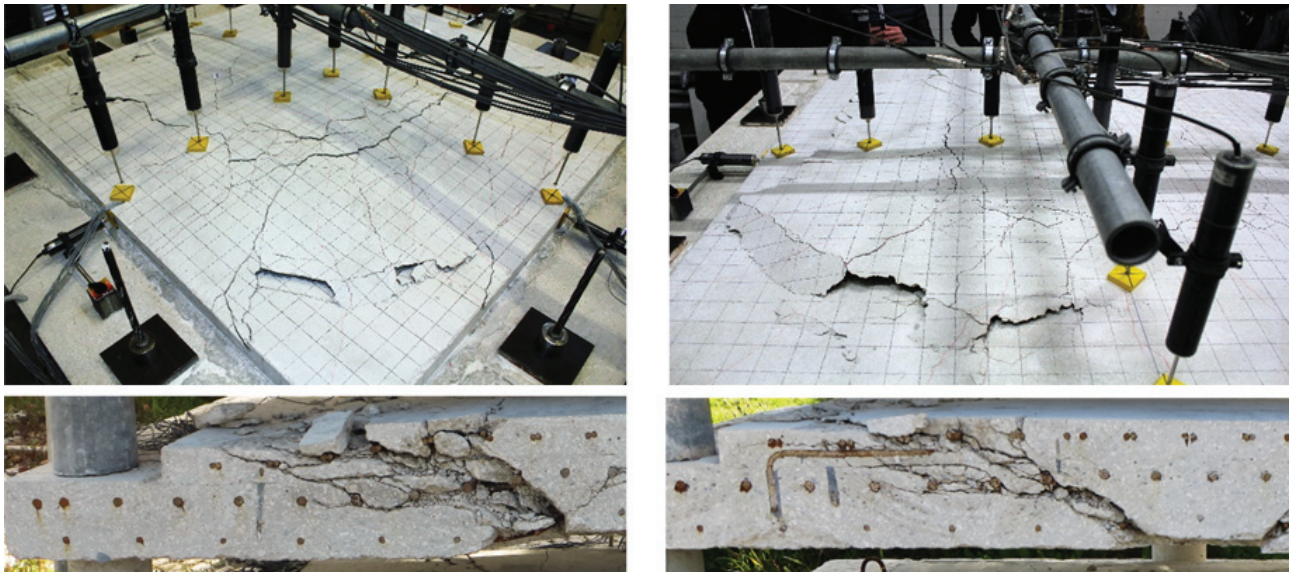

Figura 5 Rotura e pormenor da interface dos modelos SQ-STC e SQ-STANC

3 Análise numérica

3.1 Definição dos modelos numéricos

A análise numérica por elementos finitos foi realizada recorrendo a *software* de análise não-linear ATENA 3D®. Na Figura 6 é ilustrado um exemplo dos macroelementos do tipo *brick* utilizados, seccionando a geometria em prismas regulares e usando a dupla simetria para modelar apenas um quarto dos modelos experimentais, reduzindo assim o esforço computacional.

Para definição do betão foi usado o modelo constitutivo SBETA, que permite comportamento não linear em compressão, deformações plásticas (*strain softening/hardening*), fendilhação, endurecimento do material (*tension stiffening*), modelação FCM (*fixed crack modelling*) e RCM (*rotated crack modelling*). As armaduras foram modeladas por elementos lineares (Figura 6) e comportamento bilinear. A área de contacto entre camadas de betão foi caracterizada em termos de rigidez, coesão e resistência à tração, considerando para a primeira o troço ascendente ilustrado na Figura 7 [8].

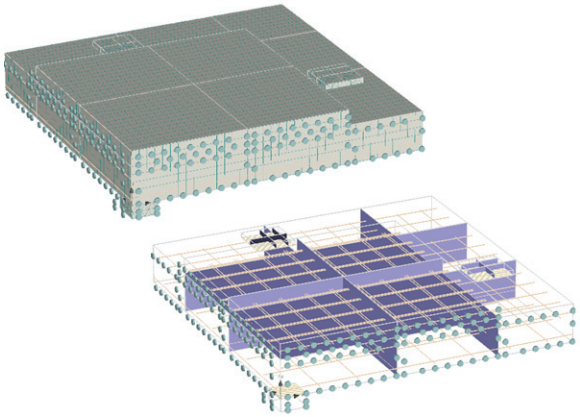

Figura 6 Geometria dos macroelementos e pormenor dos apoios e armaduras

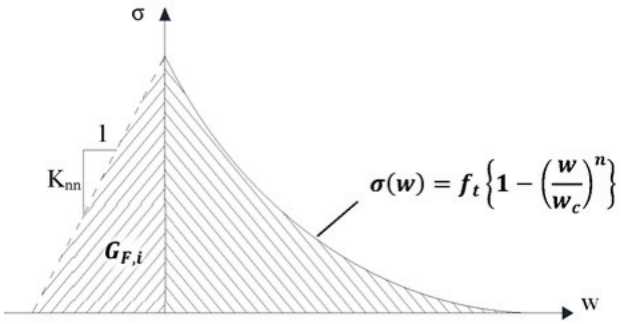

Figura 7 Relação entre tensão normal (ou tangencial) e abertura de fenda (ou deslizamento)

3.2 Modos de rotura dos modelos numéricos

Analisando os modos de rotura dos modelos numéricos é possível observar a fendilhação concentrada na zona do cone de punçoamento (Figura 8) para apenas o substrato e para um modelo reforçado. Neste último modelo é possível observar a descontinuidade das fendas quando estas atingem a interface (Figura 8).

No modelo reforçado, os diagramas das tensões tangenciais τ_{xz} e τ_{yz} nos eixos de simetria da secção composta apresentam uma elevada concentração na zona do cone de punçoamento (Figura 9), desde a face do pilar até ao nível da interface, podendo este fenómeno ser justificado pela dissipação de energia resultante da descontinuidade.

Analisando as tensões ao nível da interface é possível observar um perímetro de concentração de tensões normais de tração coincidente com o perímetro de controlo do punçoamento (Figura 10, esquerda). Este delimita a zona comprimida pela escora do mecanismo de punçoamento, coerente com a descontinuidade e rotação de corpo rígido resultante da fenda de punçoamento. As tensões horizontais são reduzidas no perímetro de controlo do punçoamento, surgindo depois deste devido às deformações relativas superiores fora deste perímetro (Figura 10, direita).

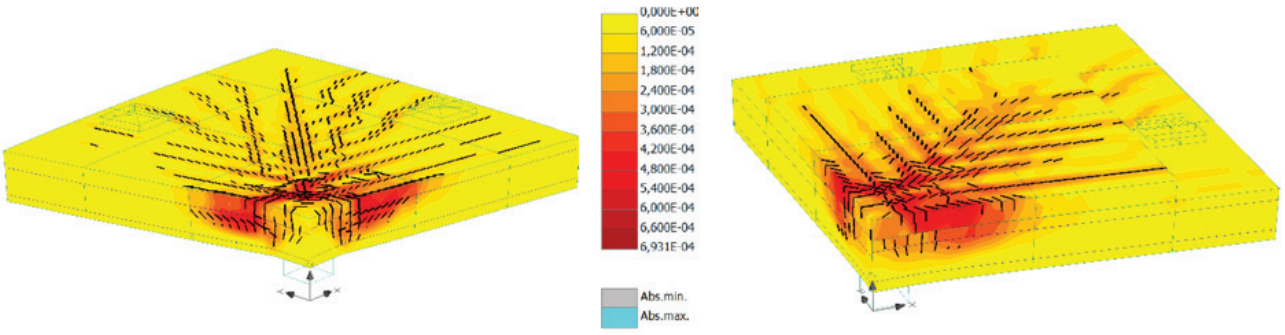

Figura 8 Fendilhação na rotura dos modelos numéricos do substrato (esquerda) e de um modelo reforçado (direita) – abertura de fenda em mm

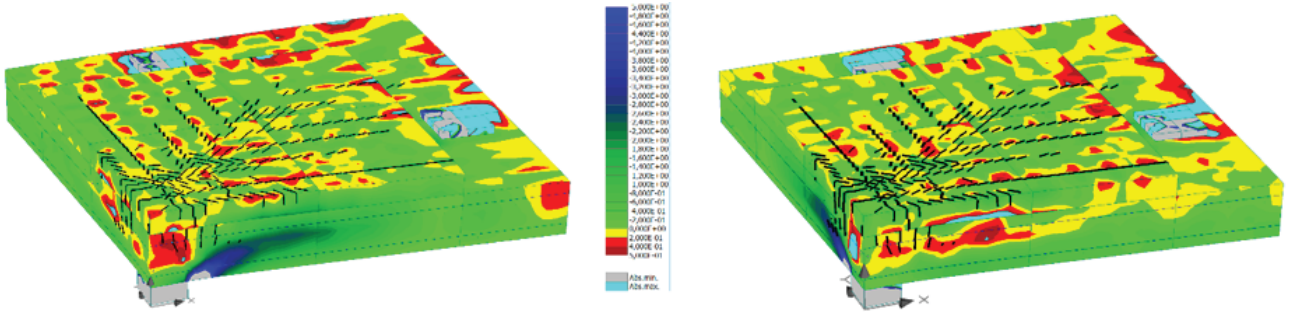

Figura 9 Tensões tangenciais nos modelos reforçados: τ_{xz} (esquerda) e τ_{yz} (direita) – tensões em MPa

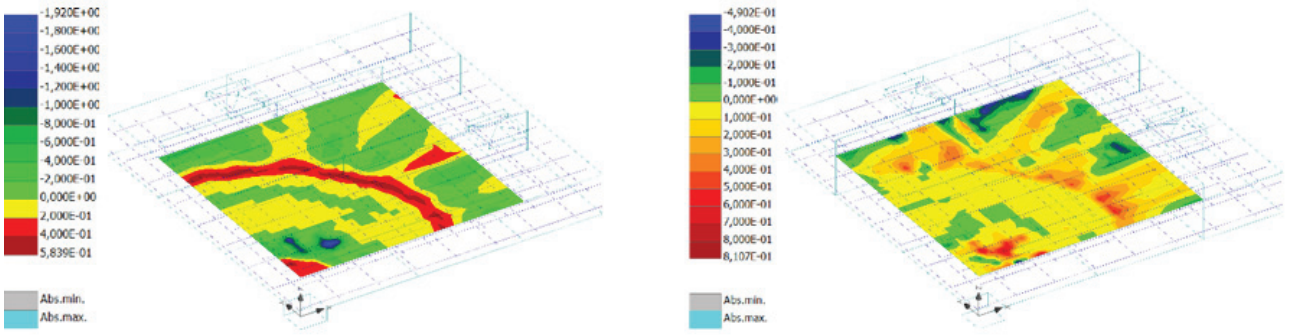

Figura 10 Tensões ortogonais (esquerda) e tangenciais (direita) na interface do modelo reforçado – tensões em MPa

4 Resultados

Todos os modelos foram carregados monotonicamente até à rotura, os experimentais por controlo de força e os numéricos por controlo de deslocamento. Na Figura 11 apresentam-se as curvas experimentais e numéricas da relação carga-deformação para cada modelo de laje.

É possível observar uma boa correlação entre os resultados experimentais e numéricos, particularmente para o comportamento dos modelos em que ocorreu o descolamento da interface (SQ-REF e SQ-ANC), tendo sido considerados na modelação os valores médios de resistência do betão para cada camada. Considerando a previsão da carga de rotura pelo MC 2010 [9] para o substrato, o maior incremento de carga ocorreu para os modelos com ferrolhos

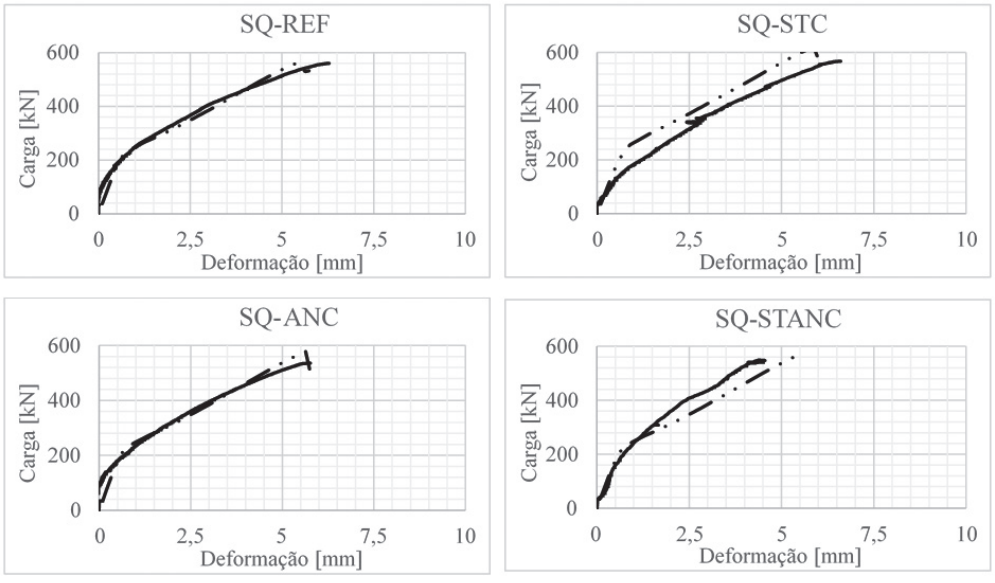

Figura 11 Relação carga-deformação no centro de cada modelo: Experimental (——) e Numérico (—— ••)

distribuídos ao longo da interface (SQ-STC e SQ-STANC), como ilustrado na Figura 12.

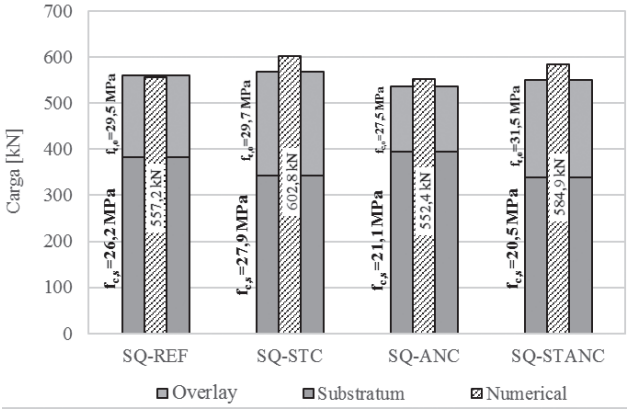

Figura 12 Cargas de rotura: medidas experimentalmente, estimadas numericamente, e resistência do substrato segundo o MC2010

As cargas de rotura dos modelos foram comparadas com as previsões de resistência ao punçoamento do MC 2010 [9] e do Eurocódigo 2 [10], sem armadura específica de punçoamento. A previsão Eurocódigo 2 [10] possui uma base empírica para dimensionamento de ligações pilar-laje, calculada de acordo com a Equação (1).

$$V_{Rd} = \frac{0{,}18}{\gamma_c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} u_1 d \geq v_{min} u_1 d \quad (1)$$

A resistência ao punçoamento do MC 2010 [9] difere do Eurocódigo 2 [10] por se basear num modelo físico (Critical Shear Crack Theory – CSCT), onde a rotação da laje ψ é contabilizada na previsão da carga de rotura, de acordo com a Equação (2).

$$\frac{V_{Rd}}{b_0 . d . \sqrt{f_{ck}}} = \frac{3/4}{1 + \frac{15 . \psi . d}{d_{g0} + d_g}} \quad (2)$$

Para utilizar estas expressões foi necessário determinar uma altura útil equivalente (d_{eq}) que tenha em consideração a posição das armaduras longitudinais do substrato (d_{sub}) e do *overlay* (d_{olay}):

$$d_{eq} = \frac{d_{sub} . A_{s,s} + d_{olay} . A_{s,o}}{A_{s,s} + A_{s,o}} \quad (3)$$

Considerando a altura útil equivalente assim estimada, que é, aproximadamente, 0,14 m, a carga de punçoamento calculada de acordo com as duas normas, e obtida numericamente, é comparada com a carga experimental no Quadro II, considerando para o MC 2010 o nível de aproximação III. A estimativa, segundo as duas normas, da resistência do substrato também é apresentada.

5 Conclusões

Os resultados apresentados permitiram aferir a *performance* de lajes fungiformes reforçadas na ligação pilar-laje com uma nova camada de betão aplicada na face tracionada. Obteve-se um incremento de carga da ordem dos 60-65% quando é usada armadura distribuída (ferrolhos) e a cruzar a interface (modelos SQ-STC e SQ-STANC). Apesar de a solução SQ-ANC ter apresentado um incremento menor de carga em relação à resistência da laje original (substrato) esta solução também é eficiente dado que controla a delaminação do reforço.

A carga de punçoamento calculada de acordo com o MC2010 resultou mais conservativa do que a obtida com o EC2 para os substratos e para os modelos onde não houve descolamento do *overlay*.

Os resultados obtidos numericamente, depois de calibrados com os resultados experimentais, permitem analisar a distribuição de tensões nos modelos, nomeadamente na interface entre as camadas de betão. A diferença máxima de 6% entre as duas cargas de rotura numérica e experimental, registada para os modelos com armadura distribuída ao longo da interface (SQ-STC e SQ-STANC), atesta a boa correlação entre os resultados.

Quadro II Cargas de punçoamento: experimental, numéricae segundo o EC2 e MC2010

	Substrato			Modelos reforçados					
	EC2 [kN]	MC2010 [kN]	Experimental [kN]	EC2 [kN]	EXP/EC2 [-]	MC2010 [kN]	EXP/MC2010 [-]	ATENA [kN]	EXP/ATENA [-]
SQ-REF	382,6	363,4	559,8	566,4	0,99	580,5	0,96	557,2	1,00
SQ-STC	343,1	337,9	567,6	526,7	1,08	520,6	1,09	602,8	0,94
SQ-ANC	394,5	370,9	535,8	578,1	0,93	598,6	0,90	552,4	0,97
SQ-STANC	338,4	334,9	549,8	522,0	1,05	513,5	1,07	584,9	0,94

Para uma caracterização completa da *performance* do reforço de lajes fungiformes reforçadas com uma nova camada de betão armado na zona tracionada, são necessários mais ensaios experimentais e modelações numéricas onde se variem as geometrias das camadas, quantidades de armadura, diferentes preparações da superfície e pormenorização das armaduras que cruzam a interface. Um dos principais parâmetros que condicionam esta técnica de reforço é a área da camada de reforço, que deve ser otimizada para a menor área que garanta todas as vantagens da sua aplicação na ligação pilar-laje de lajes fungiformes. A modelação numérica também deve ser continuada, calibrando e adequando a resposta dos modelos numéricos aos resultados experimentais.

Agradecimentos

Este trabalho teve o apoio da Fundação para a Ciência e a Tecnologia – Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior através do projeto EXPL/ECM – EST/1371/2013 e da bolsa de doutoramento SFRH/BD/89505/2012. Os autores reconhecem também as contribuições da CONCREMAT SA, da SIKA AG e da HILTI Lda., na conceção dos modelos experimentais e fornecimento dos agentes de aderência para selagem dos varões e colagem das chapas nos ensaios de arrancamento.

Referências

[1] Bissonnette, B.; Courard, L.; Fowler, D.; Granju, J. – "Bonded cement based material overlays for the repair, the lining or the strengthening of slabs or pavements". State-of-the-art report of the RILEM Technical Committee 193-RLS, 2011.

[2] Randl, N. – "Design recommendations for interface shear transfer in fib Model Code 2010". *Structural Concrete*, 14:230-41, 2013.

[3] Santos, P.; Júlio, E. – "Interface shear transfer on composite concrete members". *ACI Structural Journal*, 111:113-21, 2014.

[4] Júlio, E.; Branco, F.; Silva, V.; Lourenço, J. – "Influence of added concrete compressive strength on adhesion to an existing concrete substrate". *Building Environment*, 41:1934-9, 2006.

[5] Červenka, J.; Chandra, K.; Saouma, V. – "Mixed mode fracture of cementitious bimaterial interfaces". *Engineering Fracture Mechanics*, 60:95-107, 1998.

[6] Santos, P.; Júlio, E. – "A state-of-the-art review on roughness quantification methods for concrete surfaces". *Construction Building Materials*, 38:912-23, 2013.

[7] Perez, F.; Morency, M.; Bissonnette, B. – "Correlation between the roughness of the substrate surface and the debonding risk". *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II*, 949-56, 2009.

[8] Reinhardt, H. – "Crack softening zone in plain concrete under static loading". *Cement Concrete Research*, 15:42-52, 1985.

[9] fib – Model Code for Concrete Structures 2010. Ernst & Sohn, 434p., 2013.

[10] IPQ – Eurocódigo 2 – Projecto de estruturas de betão, Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios, 2010.