

Resistência ao punçoamento de lajes fungiformes reforçadas com UHPFRC

Mário Pimentel

CONSTRUCT – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, mjsp@fe.up.pt

Aurélio Sine

CONSTRUCT – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Sandra Nunes

CONSTRUCT – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Resumo

A reabilitação e reforço de estruturas de betão com camadas finas de compósitos cimentícios de ultra-elevado desempenho reforçados com fibras (Ultra-High Performance Fibre-Reinforced cementitious Composites – UHPFRC na sigla em Inglês) tem vindo a afirmar-se como uma técnica competitiva, sendo já inúmeros os casos de estudo em que esta técnica foi usada com sucesso. Esta técnica é especialmente eficaz no reforço de lajes, nomeadamente quando o reforço é efetuado pela deposição de uma camada de UHPFRC, normalmente contendo armaduras adicionais, sobre a superfície superior da laje e após remoção do betão de recobrimento com jato de água de alta pressão. Nestas circunstâncias, verifica-se que é possível duplicar a resistência à flexão na secção de momentos negativos com um acréscimo de apenas 10 a 15% do peso próprio da laje.

No caso de lajes fungiformes, este incremento da capacidade de carga pode vir limitado pela resistência ao punçoamento, sendo ainda limitados tanto a evidência experimental como os modelos mecânicos acerca da contribuição da camada de UHPFRC para o reforço face a este modo de rotura.

Neste trabalho são apresentados os resultados de uma campanha experimental que compreende ensaios de punçoamento em painéis de laje, tendo como variáveis a armadura na camada de reforço, a excentricidade da carga, a forma do pilar e a taxa de armaduras na laje existente. É também descrito o modelo de cálculo que permite a determinação da resistência ao punçoamento de lajes reforçadas.

Palavras-chave: Compósito cimentício de ultra-elevado desempenho reforçado com fibras (UHPFRC), reforço, punçoamento

1 INTRODUÇÃO

As técnicas de reforço de lajes fungiformes podem ser divididas em quatro grupos principais [1]: reforço da armadura de flexão, envolvendo a adição de armaduras numa nova camada de material cimentício complementar [2][3][4] ou a colagem de laminados reforçados com fibras de carbono (CFRP)[5]; armadura de punçoamento pós-instalada [6][7]; pós-tensão de cordões de pré-esforço na zona do pilar [8].

O reforço de lajes de betão armado (BA) através da deposição de uma camada de compósito cimentício de ultra-elevado desempenho reforçado com fibras (UHPFRC) tem-se revelado uma técnica extremamente eficiente [9]. A aplicação mais simples envolve apenas a deposição de uma camada complementar com 30 a 50mm de espessura sobre a face superior da laje existente. Para o efeito, é necessário a preparação da superfície a betonar com recurso a jato de água de alta pressão com vista a remover parte do recobrimento e materialização da rugosidade necessária através da exposição do agregado grosso. A camada de reforço deverá em geral conter armaduras de flexão adicionais, sendo possível mais do que duplicar a resistência à flexão da laje existente. As operações envolvidas são simples e rápidas, permitindo tempos de intervenção reduzidos. Para além do reforço, esta técnica permite resolver simultaneamente problemas de durabilidade da estrutura existente em virtude das excecionais propriedades de transporte de líquidos e gases do UHPFRC, mesmo quando submetido a tensões de tração em condições de serviço.

Uma vez que o reforço à flexão na zona de momentos negativos pode ser muito significativo, interessa perceber até que ponto esta capacidade não vem limitada pela resistência ao punçoamento da laje compósita BA-UHPFRC. A evidência experimental sobre a resistência ao punçoamento de lajes de BA reforçadas com camadas de UHPFRC são ainda escassos [3][10][11]. Neste contexto, e no âmbito de uma tese de doutoramento recentemente concluída [12], foi desenvolvida uma campanha experimental que visou esclarecer os efeitos de diversas variáveis na resistência ao punçoamento de lajes compósitas BA-UHPFRC, tais como a taxa de armadura no substrato e na camada de reforço, o efeito da excentricidade da carga e da forma da área carregada.

Nas secções seguintes, e tal como ilustrado na Figura 1, a notação RC-U refere-se a uma laje de betão armado reforçada com uma camada de UHPFRC simples, RC-RU a uma laje reforçada com uma camada de UHPFRC com armaduras convencionais e RC-RC a uma laje reforçada com uma camada adicional de betão armado.

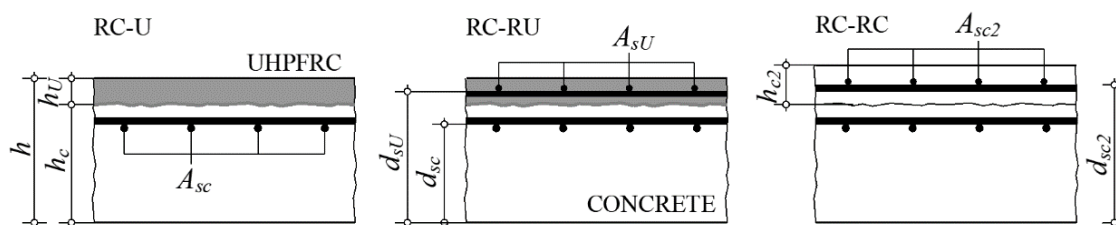


Figura 1. Identificação das secções das lajes reforçadas.

2 CRITÉRIO DE ROTURA

A *Critical Shear Crack Theory* (CSCT) foi originalmente formulada por Muttoni [13] com vista à determinação da resistência ao punçoamento de lajes de betão armado. De acordo com a CSCT, a

resistência ao punçoamento de uma laje em BA, V_c , depende da abertura da fenda crítica, w , que se assume correlacionada com o produto da rotação da laje na vizinhança do pilar, ψ , pela altura efetiva d_{sc} . Esta dependência vem expressa pelo critério de rotura definido na Eq. (1):

$$\frac{V_c}{b_0 d_{sc} \sqrt{f_c}} = \frac{3/4}{1 + 15 \frac{\psi d_{sc}}{d_{g0} + d_g}} \quad (1)$$

em que b_0 é o perímetro de controlo definido à distância $d_{sc}/2$ da face do pilar, d_g é a máxima dimensão do agregado (mm) e $d_{g0}=16\text{mm}$. A resistência ao punçoamento é obtida através da interseção da curva carga-rotação da laje com o critério de rotura, tal como ilustrado na Figura 2.

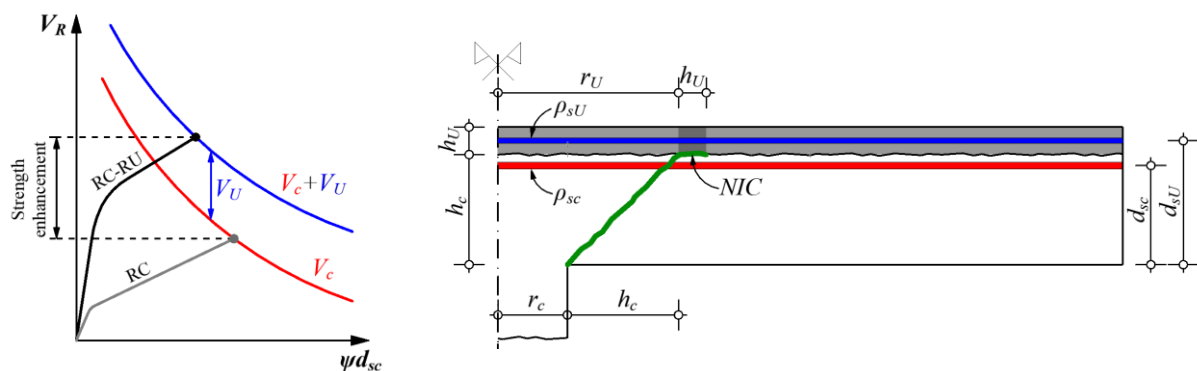


Figura 2. Determinação da resistência ao punçoamento de lajes compósitas RC-RU (ou RC-U).

Tal como discutido em [1], no contexto do reforço de lajes existentes com uma camada complementar de betão armado (RC-RC), o critério da CSCT é diretamente aplicável nos casos em que se pode assumir que o substrato não está fendilhado aquando do reforço. Nestas circunstâncias é lícito assumir que a abertura da fenda crítica, w , está relacionada com a altura efetiva da armadura na camada de reforço, d_{sc2} . Nestas circunstâncias, a critério de rotura para a laje reforçada pode ser obtido a partir da Eq. (1) substituindo d_{sc} por d_{sc2} e b_0 pelo respetivo perímetro de controlo b_{02} à distância $d_{sc2}/2$ da face do pilar.

No caso de lajes compósitas RC-U ou RC-RU, Bastein-Masse e Brühwiler [4] propuseram um critério de rotura (CFC – *composite failure criterion*) que permite ter em consideração a contribuição da camada de UHPFRC (V_U), tal que a resistência ao punçoamento, V_R , da laje compósita vem dada por $V_R = V_c + V_U$. A parcela V_U depende da resistência à tração do betão do substrato que controla o desenvolvimento da fenda próxima da interface (NIC – *near interface crack*) entre o betão existente e a nova camada de UHPFRC. Tendo a camada de UHPFRC uma resistência à tração e tenacidade elevada, verifica-se que aquando da rotura por punçoamento o cone de betão não atravessa a nova camada de UHPFRC, desenvolvendo antes uma fissura horizontal sob a interface que torna o mecanismo cinematicamente admissível. O desenvolvimento mínimo da NIC na direção radial é assumido igual à espessura da camada de reforço, h_U , ver Figura 2. A força V_U necessária para abrir a NIC é determinada de acordo com a Eq. (2) assumindo uma distribuição uniforme de tensões verticais iguais à resistência à tração do betão do substrato, f_{ct} , e que a fissura tem uma inclinação de 45° :

$$V_U = b_u h_U f_{ct} \quad (2)$$

em que b_u é o perímetro de controlo definido à distância $h_c + h_U/2$ da face do pilar.

Realça-se que na Eq. (2) não é patente a contribuição da resistência do UHPFRC para a resistência ao punçoamento, nem tão pouco é feita a distinção entre camadas de UHPFRC armadas ou simples. No entanto, e como se evidencia esquematicamente na Figura 2, a camada de UHPFRC tem um impacto direto na rigidez à flexão da laje, fazendo com que a interseção da curva força-rotação com o critério CFC se faça para cargas mais elevadas.

No caso de cargas excêntricas, e seguindo a proposta do MC2010, os perímetros de controlo b_0 e b_U são reduzidos através da sua multiplicação pelo coeficiente k_e :

$$k_e = \frac{1}{1 + e_U / (2r_U)} \quad (3)$$

em que e_U é a excentricidade da resultante das forças de corte em relação ao centroide do perímetro de controlo e r_U é o raio do círculo com a mesma área da região delimitada pelo perímetro de controlo. Daqui resulta coeficientes k_e distintos para as parcelas V_c e V_U em virtude dos perímetros de controlo associados serem b_0 e b_U , respetivamente. Este procedimento foi validado em [12].

3 CAMPANHA EXPERIMENTAL

3.1 Geometria e armaduras das lajes

Foi desenvolvida uma campanha experimental contemplando 8 lajes: 1 laje de referência (PRC), uma laje reforçada com uma camada de betão armado (PC-RC) e 6 lajes reforçadas com uma camada de UHPFRC. A informação está resumida na Tabela 1. O programa experimental foi concebido com vista a permitir a análise das seguintes variáveis: tipo de material na camada de reforço (BA ou UHPFRC); existência de armadura na camada de reforço UHPFRC; taxa de armadura no betão do substrato, forma da área carregada, e excentricidade da força.

O arranjo experimental está ilustrado na Figura 3. Todas as lajes têm uma forma octogonal circunscrita numa circunferência com 2435mm de diâmetro. A linha de momento nulo é definida pelo raio $r_q=1082$ mm. A espessura dos substratos em betão é $h_c=180$ mm, da camada de reforço em UHPFRC $h_U=40$ mm e da camada de reforço em betão armado $h_{c2}=60$ mm. A diferença entre h_U e h_{c2} prende-se com os diferentes requisitos de recobrimento mínimo das armaduras envolvidas em UHPFRC em betão convencional.

Com exceção das lajes da série PE, que foram betonadas monoliticamente com um troço de pilar, as restantes foram carregadas por aplicação da força sob uma placa de aço quadrada, ou retangular no caso da laje PRC-R-RU. A aplicação da carga excêntrica foi efetuada com recurso a uma peça metálica que encamisa o pilar, tal como se evidencia na Figura 3 c).

3.2 Materiais

As lajes foram betonadas com recurso a betão pronto, com dimensão máxima do agregado $d_g=16$ mm. A resistência à compressão em cilindros normalizados à data do ensaio foi de 39MPa, com exceção das lajes da série PE, nas quais foi de 32MPa. As armaduras são da classe A500, com valores médios da tensão de cedência de 565, 521 e 528MPa para os varões de 8, 10 e 12mm de diâmetro, respetivamente.

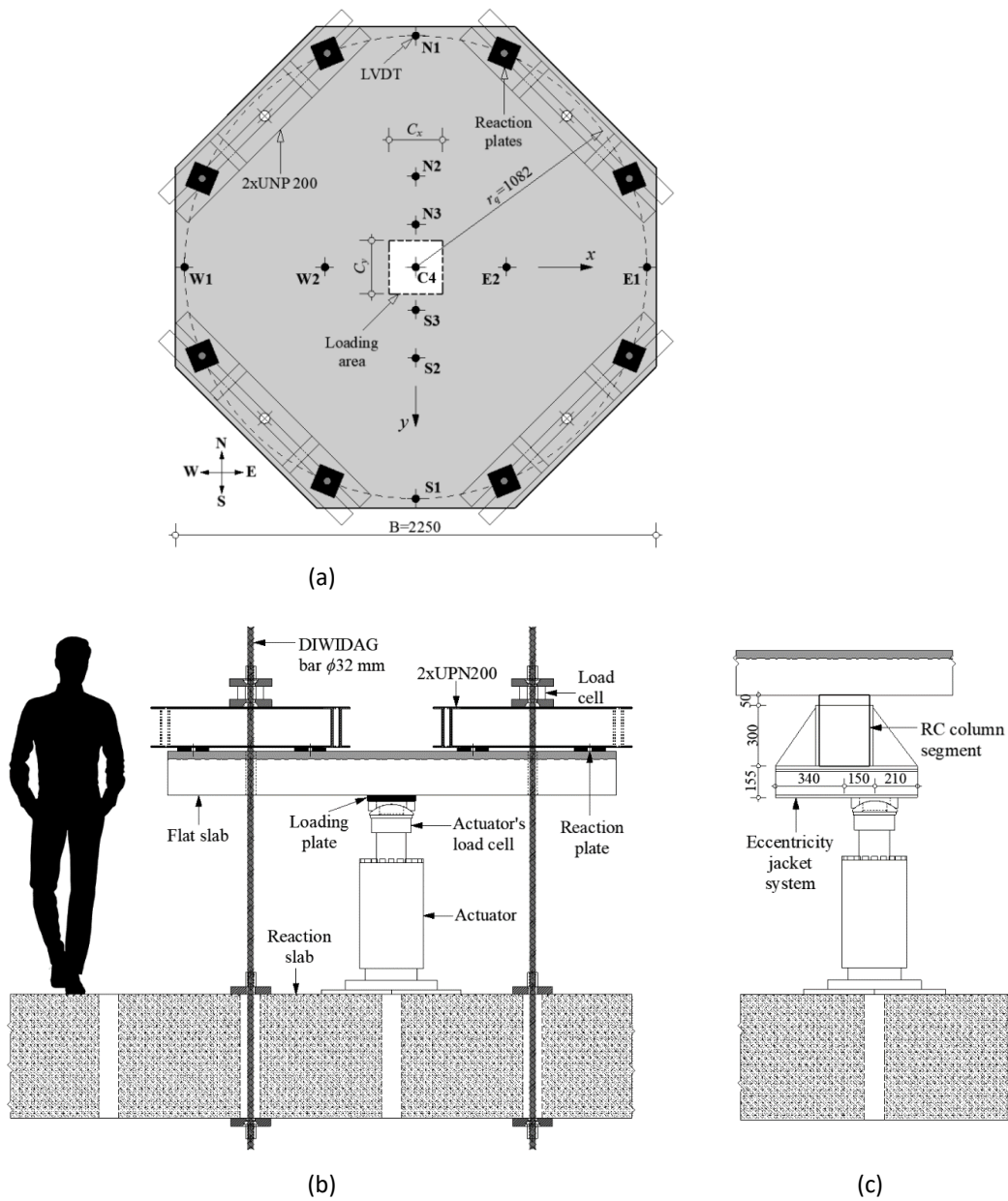


Figura 3. Arranjo experimental e notação. (a) planta; (b) corte com o arranjo para carregamento centrado; (c) carregamento excêntrico.

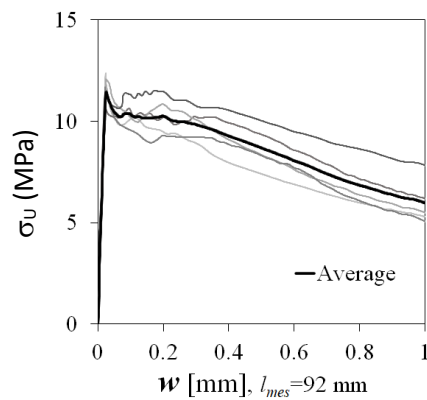


Figura 4. Curva tensão-deslocamento resultante dos ensaios de tração direta do UHPFRC.

Tabela 1. Especificações das lajes ensaiadas

Série	Ref. da laje	Secção tipo	B [mm]	r_q [mm]	$C_x \times C_y$ [mm ²]	Substrato em betão armado				Camada de reforço			
						h_c [mm]	d_{sc} [mm]	Bars	ρ_{sc} [%]	$h_{U(c2)}$ [mm]	$d_{SU(c2)}$ [mm]	Bars	$\rho_{SU(c2)}$ [%]
PC	PC-RC	RC-RC	2250	1082	250x250	180	150	# ϕ 8	0.17	60	210	# ϕ 10	1.31
	PC-RU	RC-RU					151	//200	0.17	40	200	//100	1.96
PRC						PRC	RC	190	142	# ϕ 12	0.64	-	-
	PRC-U	RC-U				146	0.62		40		200	# ϕ 10	1.96
	PRC-RU	RC-RU			175x350	159	0.57						
	PRC-R-RU					158	//125	0.57					
PE	PE-RU1	RC-RU			250x250	154	147	0.59		//100			
	PE-RU2 ^{a)}							0.62					

^{a)} – laje testada com excentricidade de força $e=150$ mm

3.3 Procedimento de reforço

O recobrimento das lajes reforçadas foi removido com recurso a hidrodemolição com jato de água de alta pressão, ver Figura 5 (a). Este procedimento permitiu remover uma camada de cerca de 10mm, expondo o agregado grosso e criando uma superfície rugosa. Foi aplicado o *sand patch test* de acordo com a norma ASTM E965, tendo-se obtido uma rugosidade média de 6.3mm.

A superfície foi limpa e, antes da betonagem das camadas de reforço, foi mantida saturada para não absorver água da material do reforço. Foram efetuados ensaios de arrancamento para aferir a resistência à tração da interface entre o material de reforço e o substrato. Cerca de 75% dos ensaios realizados na laje reforçada com betão convencional romperam na interface. No caso das lajes reforçadas com UHPFRC, todos os ensaios evidenciaram rotura no substrato. Não foi aplicada qualquer meio adicional de conexão mecânica entre o material de reforço e o substrato.



(a)



(b)

Figura 5. Preparação das lajes: (a) hidrodemolição da camada de recobrimento; (b) betonagem da camada de UHPFRC.

3.4 Arranjo experimental e instrumentação

As lajes foram apoiadas em oito pontos ao longo de uma circunferência com 2164mm de diâmetro. Tal como se evidencia na Figura 3, a força foi aplicada de baixo para cima com recurso a um atuador servo-controlado com 1500kN de capacidade, com controlo de deslocamento e impondo uma velocidade de 0.01mm/s do embolo do atuador. As lajes foram fixadas à laje de reação do laboratório com recurso a 4 varões DYWIDAG com 32mm de diâmetro. Tal como se indica na Figura 3 (a), foram medidos deslocamentos verticais em 11 pontos com recurso a LVDTs dispostos em dois alinhamentos ortogonais e fixados num pórtico independente.

A rotura de punçoamento foi identificada pela súbita descida da força no atuador após a carga de pico ter sido atingida. Depois deste instante os ensaios foram prolongados em geral durante 10 minutos adicionais. Após o ensaio, as fissuras visíveis na face superior da laje foram marcadas e as lajes serradas com vista à identificação dos ângulos das fissuras diagonais e medição da altura efetiva real das armaduras.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todas as lajes romperam por punçoamento. Os resultados experimentais são apresentados na Tabela 2, nomeadamente a carga de rotura $V_{R,exp}$, o correspondente deslocamento relativo do pilar $\delta_{R,exp}$ face ao contorno e a rotação $\psi_{R,exp}$. A rotação foi determinada dividindo $\delta_{R,exp}$ pela distância $r_q - r_c$, em que r_c é o raio da circunferência com o mesmo perímetro da área carregada. Obtiveram-se taxas de reforço ao punçoamento ($v_{R,exp}/v_{R,RC}$, em que $v_{R,RC}$ é a resistência normalizada da laje original) bastante elevados, nomeadamente quando se colocam armaduras na camada de UHPFRC.

As curvas força deslocamento são apresentadas na Figura 6. No caso da laje com excentricidade PE-RU2, os deslocamentos da primeira fase do ensaio não estão representados devido a um problema com sistema de fixação que originou deslocamentos de corpo rígido que afetaram as medições. Só após descarga estes problemas foram corrigidos, tendo o ensaio sido retomado com a recarga da laje até à rotura.

Tabela 2. Resultados experimentais e comparação com a resistência calculada.

Laje	$V_{R,exp}$ [kN]	$\delta_{R,exp}$ [mm]	$\psi_{R,exp}$ [‰]	$V_{R,calc}$ [kN]	$\psi_{R,calc}$ [‰]	$V_{U,calc}$ [kN]	$v_{R,exp}/v_{R,RC}$	$V_{R,exp}/V_{R,calc}$	$\psi_{R,exp}/\psi_{R,calc}$
PRC	431	23.8	25.8	402	17.6	-	1.00	1.07	1.47
PRC-U	682	17.6	19.1	681	20.6	262	1.38	1.00	0.93
PRC-RU	1024	11.4	12.4	932	9.0	262	1.85	1.10	1.38
PRC-R-RU	952	8.7	9.6	949	9.4	268	1.68	1.00	1.02
PC-RC	764	22.7	25.1	708	13.3	-	4.76 ^{a)}	1.08	1.89
PC-RU	929	13.9	14.8	865	10.5	262	5.84 ^{a)}	1.07	1.41
PE-RU1	940	8.0	8.6	874	6.9	208	1.96	1.08	1.24
PE-RU2	686	7.4	8.0	618	8.1	172	1.92	1.11	1.14
Média ^{b)}								1.06	1.19
Desvio padrão ^{b)}								0.04	0.17

^{a)} Determinado considerando a resistência à flexão do substrato, V_{flex} .

^{b)} Excluídas a laje de referência PRC e a laje reforçada com camada de betão PC-RC.

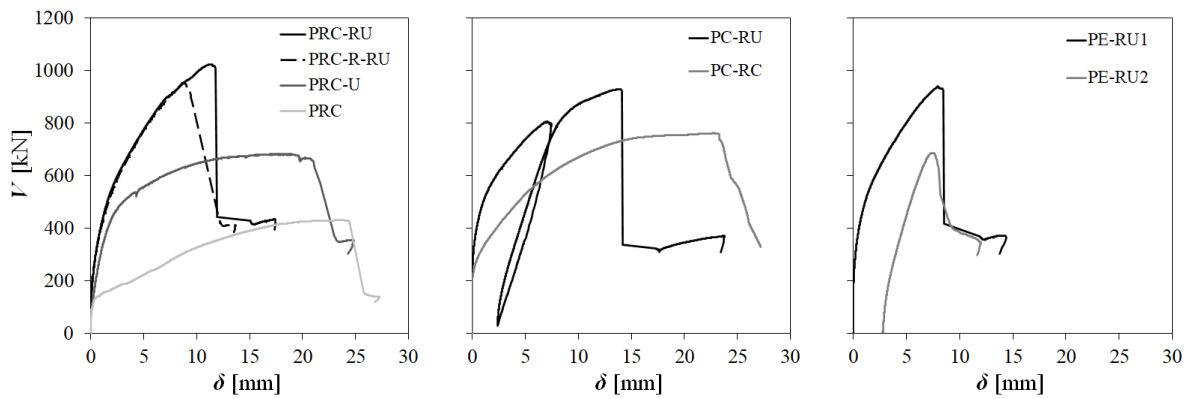


Figura 6. Curvas carga-deslocamento.

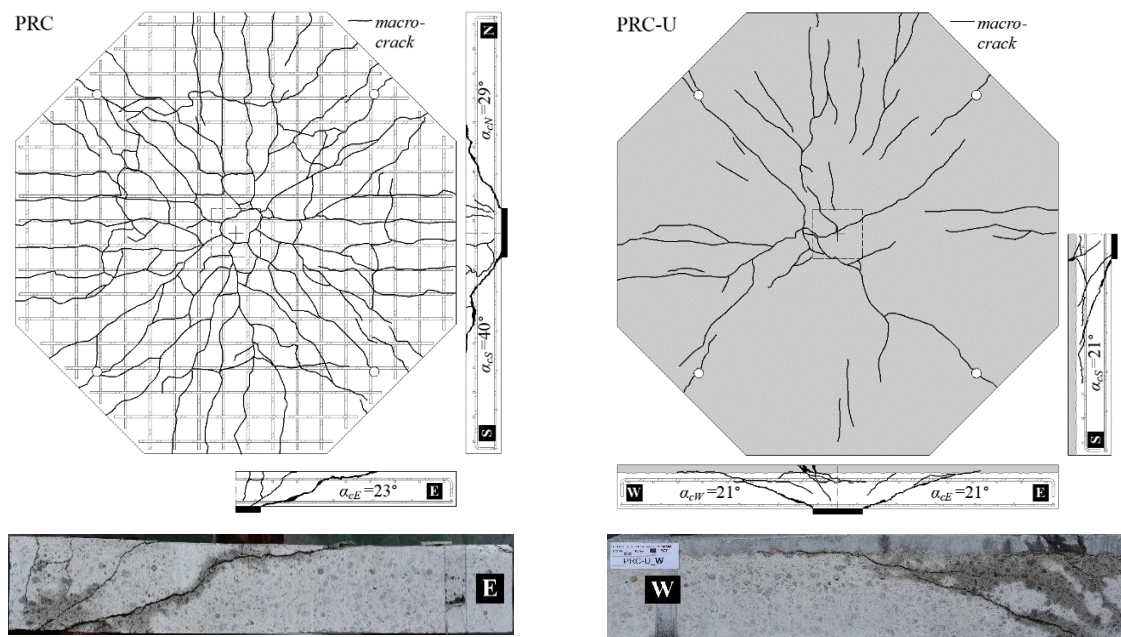


Figura 7. Padrão de fendilhação das lajes: (a) PRC; (b) PRC-U.

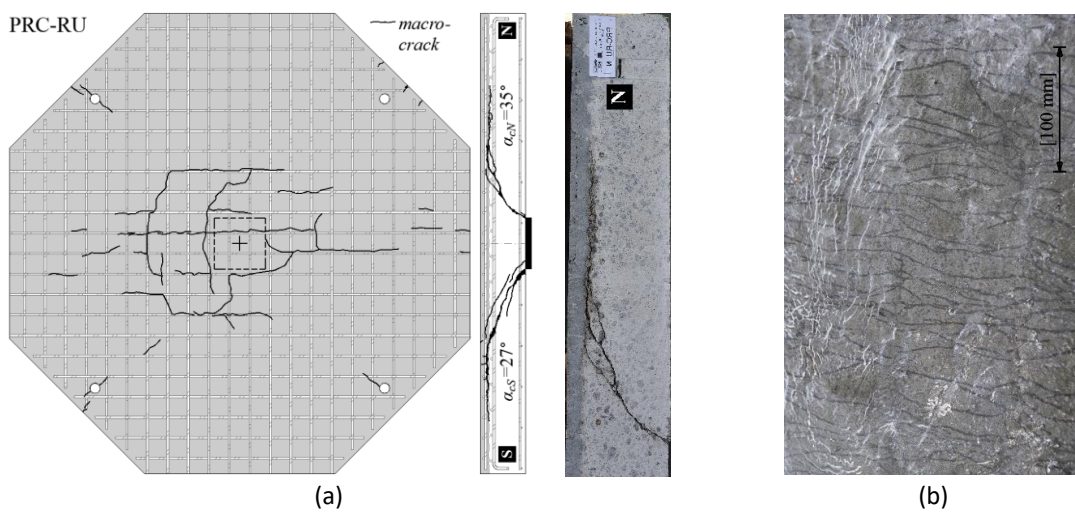


Figura 8. Padrão de fendilhação ds lajes PRC-RU: (a) fendas visíveis e corte; (b) micro fendas visíveis após aspersão da superfície com álcool.

No caso das lajes PRC (referência), PC-RC e PRC-U as curvas carga deslocamento evidenciam que capacidade de carga por flexão foi praticamente atingida. Os padrões de fendilhação observados na face superior confirmam esta observação, na medida em que são visíveis fissuras radiais que se desenvolvem desde o centro até aos bordos livres das lajes, ver Figura 7. No caso da laje PRC-U, a rotura de punçoamento ocorreu quando a carga de pico já havia sido atingida, ainda que estes tenham sido eventos muito próximos. No caso das lajes com armadura na camada de UHPFRC, e após aspersão da superfície com uma solução alcoólica, observou-se um padrão denso de micro fendas com aberturas inferiores a 50 μ m e espaçamento na ordem dos 15 a 20mm (Figura 8). Nas lajes reforçadas com UHPFRC observou-se sempre que a fissura diagonal se propagava horizontalmente sob a interface com a camada de reforço.

Recorrendo às curvas força-rotação experimentais e sua interseção com o critério de rotura compósito definido pela soma das contribuições das Eqs. (1) e (2), $V_R=V_c+V_u$, foram determinadas as cargas de rotura $V_{R,calc.}$ e as correspondentes rotações no ponto de interseção $\psi_{R,calc.}$. Estes resultados estão resumidos na Tabela 2 e o procedimento ilustrado na Figura 9. No caso das lajes PRC e PC-RC, o critério de rotura vem definido apenas pela Eq. (1). Verifica-se uma concordância assinalável entre as forças de rotura experimentais e as calculadas, o que valida a o critério de rotura adotado.

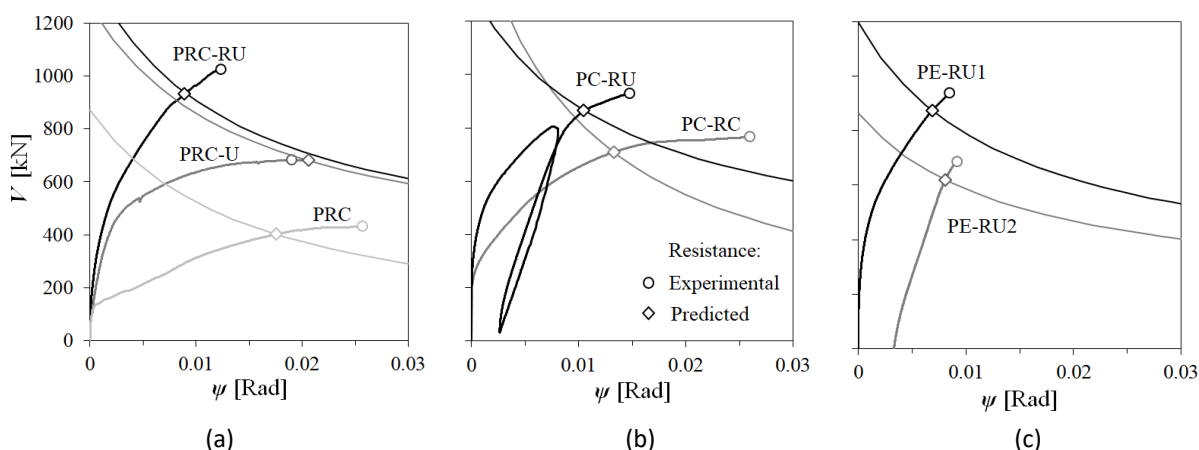


Figura 9. Curvas carga-rotação experimentais e determinação da resistência através dos critérios de rotura.

5 CONCLUSÕES

Foi apresentada uma campanha experimental contemplando ensaios de punçoamento em 6 lajes reforçadas com uma camada de UHPFRC, uma laje de referência e uma laje reforçada com camada de betão armado convencional. Os resultados evidenciam a contribuição significativa da camada de UHPFRC, tendo sido possível incrementar 2.38 vezes a resistência face à laje de referência dotada de uma taxa de armadura de flexão de 0.64%. No caso das lajes contendo apenas uma armadura mínima no substrato, o aumento de resistência foi ainda mais significativo, tendo-se observado que a resistência ao punçoamento da laje compósita é essencialmente governada pela rigidez e resistência à tração da nova camada de UHPFRC. O procedimento de cálculo da resistência ao punçoamento baseado no critério de rotura demonstrou ser adequado, tendo sido possível explicar o efeito de todas as variáveis estudadas.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por: Financiamento Base (UIDB/04708/2020) e programático (UIDP/04708/2020) da Unidade de Investigação CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - através da FCT/MCTES (PIDDAC); projeto HiperSlab (PTDC/ECI-EST/30511/2017) financiado por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC); projeto UHPGRADE (PTDC/ECI-EST/31777/2017) financiado pelo FEDER através do COMPETE2020-POCI e por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC). Os autores agradecem o apoio do Laboratório de Engenharia de Moçambique (LEM) e da Fundação Calouste Gulbenkian através da bolsa de doutoramento nº144945 atribuída ao segundo autor, e a colaboração das empresas Gabriel Couto, LimpaCanal e RasgAbre.

REFERÊNCIAS

- [1] Lapi, M., Pinho Ramos, A., Orlando, M. (2019). Flat Slab Strengthening Techniques against Punching-Shear. *Engineering Structures* 180: 160–80.
- [2] Lapi, M., Fernandes, H., Orlando, M. Pinho Ramos, A., and Lúcio, V. (2018). Performance Assessment of Flat Slabs Strengthened with a Bonded Reinforced Concrete Overlay. *Magazine of Concrete Research* 70 (9): 433–51.
- [3] Bastien-Masse, M., and Brühwiler, E. (2015). Experimental Investigation on Punching Resistance of R-UHPFRC–RC Composite Slabs. *Materials and Structures* 49: 1573–90.
- [4] Bastien-Masse, M., and Brühwiler, E. (2016). Composite Model for Predicting the Punching Resistance of R-UHPFRC–RC Composite Slabs. *Engineering Structures* 117: 603–16.
- [5] Koppitz, R., Kenel, A., Keller, T. (2013). Punching Shear of RC Flat Slabs – Review of Analytical Models for New and Strengthening of Existing Slabs. *Engineering Structures* 52: 123–30.
- [6] Fernandez Ruiz, M., Muttoni, A., Kunz, J. (2010). Strengthening of Flat Slabs Against Punching Shear Using Post-Installed Shear Reinforcement. *ACI Structural Journal*, 107, 4, 434-442.
- [7] Inácio, M. M. G., Pinho Ramos, A. Faria, D. M. V. (2012). Strengthening of flat slabs with transverse reinforcement by introduction of steel bolts using different anchorage approaches. *Engineering Structures* 44: 63-77.
- [8] Faria, D. M. V. , Lúcio, V., Pinho Ramos, A. (2012) Post-punching behaviour of flat slabs strengthened with a new technique using post-tensioning. *Engineering Structures*, Vol. 40, p.383–397.
- [9] Brühwiler, E., Denarié, E. (2013). Rehabilitation and Strengthening of Concrete Structures Using Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete. *Structural Engineering International* 23 (4): 450–57.
- [10] Wuest, J. (2007). Comportement Structural Des Bétons de Fibres Ultra Performants En Traction Dans Des Éléments Composés. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, PhD Thesis.
- [11] Youm, H S, Hong, S. G. (2018). Evaluation for Punching Shear Strength of Slab-Column Connections with Ultra High Performance Fiber-Reinforced Concrete Overlay. *International Journal of Structural and Construction Engineering* 12 (1): 56–61.
- [12] Sine, A. (2021). Strengthening of reinforced concrete elements with UHPFRC. Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia. PhD Thesis.
- [13] Muttoni, A. (2008). Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Slabs without Transverse Reinforcement. *ACI Structural Journal* 105 (4): 440–50.