

Utilização racional de betão de elevada resistência em lajes fungiformes

Rational use of high strength concrete in flat slabs

Micael Inácio
André Almeida
Válter Lúcio
António Ramos

Resumo

Ensaio experimentais em modelos de laje fungiforme mostram que a utilização de betão de elevada resistência (BER) melhora o seu comportamento ao punçoamento. No entanto, dado o seu custo de produção mais elevado, faz sentido que se procure uma forma de utilização parcial do BER, de maneira a usufruir das suas características nas zonas da estrutura onde as suas características são mais importantes.

Neste trabalho é apresentado um estudo experimental cujo objetivo foi o de estudar a aplicação racional de BER tendo em vista a melhoria do comportamento ao punçoamento de lajes fungiformes. Foram ensaiados quatro modelos de laje fungiforme com utilização parcial de BER e dois modelos adicionais de referência produzidos totalmente com betão convencional.

Os resultados obtidos nos ensaios mostram que se consegue um incremento da capacidade resistente ao punçoamento de até 38%, com utilização racional de BER, quando comparado com os modelos totalmente em betão convencional.

Abstract

Experimental tests on flat slab specimens show that the use of high strength concrete (HSC) can improve its punching behavior. However, because of its higher production cost compared to normal strength concrete and to take advantage of its enhanced mechanical properties in the zones of the structure where these characteristics are most important is essential to study a way for using HSC partially.

This work presents an experimental study whose objective was to study the rational application of HSC in order to improve the punching behavior of flat slabs. Four flat slab specimens with partial use of HSC and two additional specimens produced entirely with conventional concrete were tested.

The results obtained in the tests show that an increase of the punching capacity of up to 38% can be obtained, with a rational use of HSC, when compared to the specimens totally in conventional concrete.

Palavras-chave: Punçoamento / Betão de elevada resistência / Laje fungiforme

Keywords: Punching / High strength concrete / Flat slab

Micael Inácio

Universidade Nova de Lisboa,
Departamento de Engenharia Civil
Caparica, Portugal
mmgi@fct.unl.pt

André Almeida

Universidade Nova de Lisboa
Departamento de Engenharia Civil
Caparica, Portugal
afa17639@fct.unl.pt

Válder Lúcio

CERIS, ICIST, Universidade Nova de Lisboa
Departamento de Engenharia Civil
Caparica, Portugal
vjgl@fct.unl.pt

António Ramos

CERIS, ICIST, Universidade Nova de Lisboa
Departamento de Engenharia Civil
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.

INÁCIO, M. [et al.] – Utilização racional de betão de elevada resistência em lajes fungiformes. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 5. ISSN 2183-8488. (novembro 2017) 27-36.

1 Introdução

Existem na bibliografia alguns trabalhos realizados com o objetivo de estudar o comportamento ao punçoamento de lajes fungiformes com utilização parcial de betões com características melhoradas [1]–[3].

Estudos anteriores realizados pela equipa de investigação em que este trabalho se insere [4] revelaram que, alterando-se de forma independente as propriedades do betão, a resistência à compressão tinha um papel determinante na resistência ao punçoamento. Desta forma, foi pensada uma solução em que o uso do BER se limitasse à zona onde as compressões são mais elevadas, ou seja, junto ao pilar e à face inferior da laje.

Neste trabalho são apresentados e analisados os resultados de uma campanha experimental realizada para o estudo de utilização parcial de BER em lajes fungiformes.

2 Modelos experimentais

Os modelos utilizados consistiam em painéis quadrados de laje em betão armado. Estes painéis pretendiam simular a zona de laje, delimitada pela linha de momentos nulos, junto a um pilar interior de uma estrutura em laje fungiforme com aproximadamente 3,5 m de vão. A esbelteza (l/h) dos modelos utilizados foi de cerca de 28, o que se enquadra na ordem dos valores habitualmente recomendados para o dimensionamento deste tipo de estruturas.

Foram ensaiados sete painéis quadrados de laje fungiforme com 1650 mm de lado e 125 mm de espessura. Em quatro destes modelos foi utilizado BER na zona junto ao pilar, dois foram totalmente fabricados com betão de resistência normal e um em BER, para servirem de comparação.

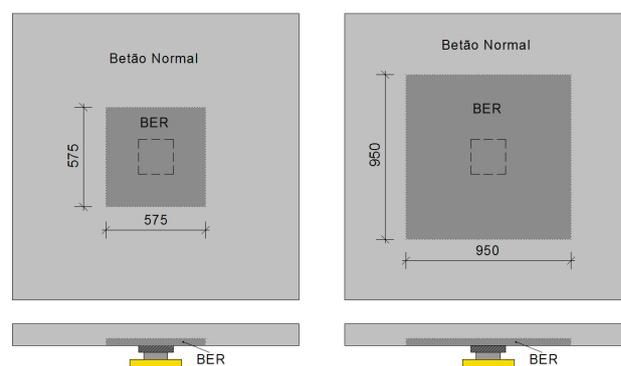


Figura 1 Geometria dos modelos com utilização parcial de BER

Nos modelos com utilização parcial de BER, a zona em BER era quadrada, com espessura igual a um terço da espessura das lajes e com diferentes geometrias em planta. Em duas lajes foi utilizada uma camada de BER com dimensões em planta iguais a uma vez e meia a espessura da laje para cada lado do pilar. Nas outras duas foi adotada uma camada de BER com maiores dimensões em planta, correspondendo a três vezes a espessura da laje para cada lado do pilar. A Figura 1 apresenta as duas geometrias utilizadas na zona com utilização de BER. O Quadro I apresenta as dimensões

da zona em BER adotada para cada laje assim como o valor médio da percentagem de armadura longitudinal superior de todos os modelos.

Quadro I Geometria da zona em BER, altura útil e percentagem geométrica de armadura

Modelo	Geometria da zona em BER (mm)	d (mm)	ρ (%)
SHSC2	1650 × 1650 × 125	101,6	1,24
SNSC4	–	100,7	1,25
SHSC5	950 × 950 × 42	100,6	1,25
SNSC6	–	100,2	1,25
SHSC7	575 × 575 × 42	100,0	1,26
SHSC8	575 × 575 × 42	100,8	1,25
SHSC9	950 × 950 × 42	100,9	1,25

d – altura útil média da armadura superior; ρ – percentagem geométrica média da armadura longitudinal superior.

A colocação dos betões de elevada resistência e de resistência normal foi realizada com cerca de 30 min de intervalo, de forma a evitar juntas de betonagem entre betões de idades muito diferentes. As lajes foram cobertas durante as 24 horas seguintes à betonagem por uma manta de serapilheira humedecida. Após as 24 horas de cura, as lajes foram desmoldadas e armazenadas, permanecendo cobertas por uma manta de serapilheira molhada periodicamente, através da instalação de um sistema de rega automático. Sobre a serapilheira foi colocada uma membrana de polietileno. Com a implementação deste sistema pretendeu-se que as condições de cura das lajes fossem próximas das condições de cura dos provetes de caracterização do betão.

2.1 Sistema de ensaio

O sistema de ensaio utilizado está esquematizado na Figura 2. O carregamento vertical e centrado foi aplicado através de um macaco hidráulico com 1000 kN de capacidade colocado sob os modelos. A utilização de uma unidade de controlo de pressão hidráulica garantiu a aplicação da força a uma velocidade de carga de 0,25 kN/s.

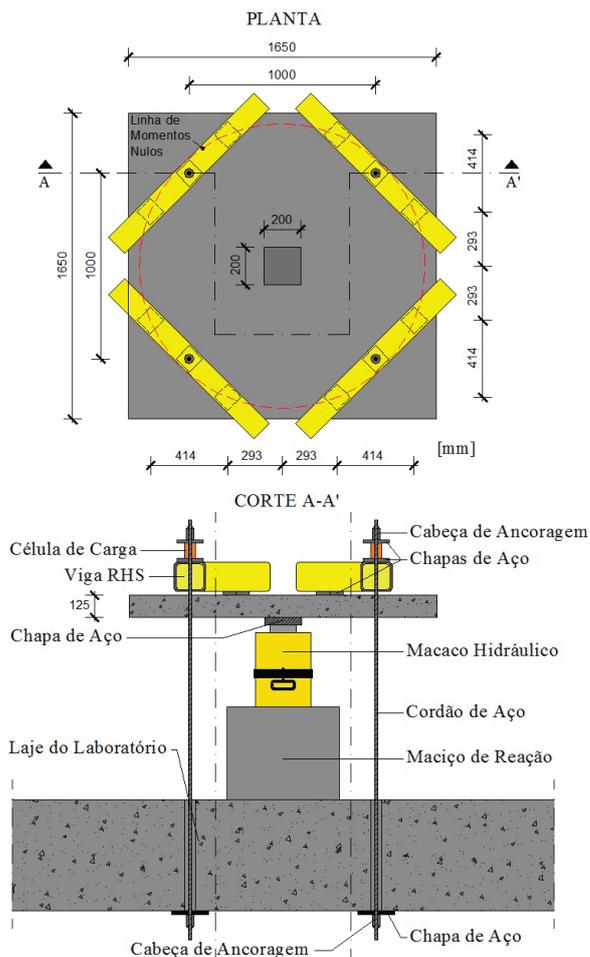


Figura 2 Sistema de ensaio utilizado (dimensões em mm)

O pilar foi simulado usando uma chapa quadrada metálica com 50 mm de espessura e 200 mm de lado, colocada sobre o macaco. O modelo foi fixado à laje de reação do laboratório por quatro perfis metálicos RHS 150 × 150 × 10 mm apoiados na sua face superior através de oito chapas de aço dispostas ao longo da linha de momentos nulos. As vigas metálicas foram ancoradas à laje de reação do laboratório através de quatro cordões de aço de alta resistência com 0,6" de diâmetro.

2.2 Materiais

O BER utilizado foi produzido com agregados grossos de basalto e duas areias lavadas de granulometria diferente. O betão convencional foi produzido com agregados grossos de calcário e duas areias lavadas. A máxima dimensão dos agregados utilizados é de 13,2 mm e 13,9 mm, no betão convencional e no BER, respetivamente. As composições dos betões utilizados são apresentadas no Quadro II.

Com vista à caracterização do BER foram betonados nove provetes cilíndricos com 300 mm de altura e 150 mm de diâmetro e 6 provetes cúbicos de 100 mm de aresta. A utilização de provetes cúbicos com 100 mm de aresta em vez dos tradicionais provetes com 150 mm de aresta justifica-se por limitações na capacidade de carga da prensa para ensaiar à compressão os cubos com 150 mm de aresta. Para caracterização do betão normal foram produzidos nove provetes cilíndricos com 300 mm de altura e 150 mm de diâmetro e seis provetes cúbicos de 150 mm de lado.

Os ensaios à compressão dos provetes foram realizados de acordo com a NP EN 12390-3 [5] e a resistência à tração por compressão diametral foi obtida por ensaio de cilindros de acordo com a NP EN 12390-6 [6]. O módulo de elasticidade dos betões foi determinado através de ensaios de compressão em cilindros, de acordo com a especificação E 397 do LNEC [7]. Os cilindros, com exceção dos utilizados para o ensaio de tração por compressão diametral, foram sujeitos à preparação das bases, garantindo que ficam planas e perpendiculares ao eixo do cilindro. A caracterização do aço das armaduras longitudinais foi feita através de ensaios de tração a três provetes por cada tipo de varão utilizado, de acordo com a EN 10002-1 [8]. Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos betões e das armaduras longitudinais são apresentados nos Quadros III e IV, respetivamente.

Quadro III Propriedades mecânicas dos betões utilizados (MPa)

Modelo		f_c	f_{cc}	$f_{cc,100}$	$f_{ct,sp}$	$E_c (\times 10^3)$
SHSC2	BER	130,1	–	129,7	8,4	55,5
SNSC4	Betão Normal	35,9	34,2	–	2,6	32,6
SHSC5	BER	118,5	–	118,4	8,0	53,1
	Betão Normal	58,0	58,8	–	4,0	40,2
SNSC6	Betão Normal	23,0	25,1	–	2,5	31,5
SHSC7	BER	127,3	–	132,1	7,2	53,0
	Betão Normal	24,7	24,3	–	2,6	34,0
SHSC8	BER	125,2	–	124,0	7,5	53,8
	Betão Normal	38,9	36,0	–	3,1	35,7
SHSC9	BER	125,8	–	125,9	7,9	52,5
	Betão Normal	39,1	37,2	–	2,8	37,2

f_c – valor médio da tensão de rotura do betão à compressão em cilindros 150 × 300 mm; f_{cc} – valor médio da tensão de rotura do betão à compressão em cubos 150 × 150 × 150 mm; $f_{cc,100}$ – valor médio da tensão de rotura do betão à compressão em cubos 100 × 100 × 100 mm; $f_{ct,sp}$ – valor médio da tensão de rotura à tração do betão determinada através do ensaio de compressão diametral em cilindros 150 × 300 mm; E_c – módulo de elasticidade do betão.

Quadro II Composições dos betões utilizados (kg/m³)

	BER	Betão normal		
		SHSC5	SNSC6 e SHSC7	SNSC4, SHSC8 e SHSC9
Cimento	500 CEM I 52,5 R	450 CEM II/B-L 32,5 N	280 CEM II/B-L 32,5 N	320 CEM II/B-L 32,5 N
Sílica de fumo	50	–	–	–
Brita basalto (10/16)	249	–	–	–
Brita basalto (8/12,5)	839	–	–	–
Brita calcário (6/12,5)	–	871	880	906
Areia (0/4)	489	655	597	626
Areia (0/2)	249	117	311	286
Superplastificante	8,43	–	–	–
Água	139,1	208,2	163,4	184,3

Quadro IV Propriedades mecânicas do aço das armaduras longitudinais (MPa)

Modelo	Armadura superior		Armadura inferior	
	f_y	f_t	f_y	f_t
SHSC2	523,4	671,4		
SNSC4	532,3	642,6		
SHSC5	523,4	671,4		
SNSC6	523,4	671,4	549,7	697,3
SHSC7	523,4	671,4		
SHSC8	532,3	642,6		
SHSC9	532,3	642,6		

f_y – tensão de cedência à tração do aço; f_t – tensão de rotura à tração do aço.

2.3 Monitorização

Durante os ensaios das lajes foram monitorizados os deslocamentos verticais e as forças aplicadas (Figura 3 (a)). O equipamento de medida ou de monitorização foi ligado a quatro unidades de aquisição de dados em série.

Os deslocamentos verticais na face superior das lajes foram medidos através da utilização de 11 defletómetros elétricos, posicionados em dois alinhamentos ortogonais, conforme esquematizado na Figura 3 (b). As forças de reação nos cordões de fixação do modelo à laje de reação foram medidas por quatro células de carga com 200 kN de capacidade.

3 Apresentação e análise de resultados

Nesta secção são apresentados e analisados os resultados dos ensaios experimentais em termos de deslocamentos verticais, capacidade de carga, modo de rotura e superfície de rotura.

As cargas referidas ao longo desta secção correspondem à soma das forças medidas nas células de carga utilizadas no sistema de ensaio, do peso próprio dos elementos do sistema de ensaio e de monitorização colocados sobre a laje e do peso próprio da laje. O valor inicial de força apresentado nos gráficos corresponde ao peso próprio do sistema de ensaio e da laje, perfazendo um total de 12,8 kN.

3.1 Deslocamentos verticais

Nas Figuras 4 e 5 são apresentados os diagramas com a evolução dos deslocamentos verticais relativos ao seu centro, para os modelos de referência (totalmente executados com betão normal e BER) e para os modelos com utilização parcial de BER, respetivamente. Em cada direção foi calculado o valor médio do deslocamento de cada par de defletómetros colocados à mesma distância do centro da laje. O Quadro V apresenta para todas as lajes a rigidez fendilhada (k_f), a deformada para a carga de rotura (Δ_u), a carga de rotura (V_{exp}) e a energia de deformação (U), que corresponde à área do diagrama força-deslocamento. Os parâmetros apresentados referem-se aos pontos de medição D8-D11.

O comportamento força-deslocamento é em geral semelhante em todos os modelos. Comparando os dois modelos produzidos inteiramente em betão normal, SNSC4 e SNSC6, verifica-se que a carga para a qual se inicia a fendilhação é ligeiramente inferior no modelo SNSC6. As diferenças referidas no comportamento dos modelos de referência justificam-se pela maior resistência do betão usado no SNSC4.

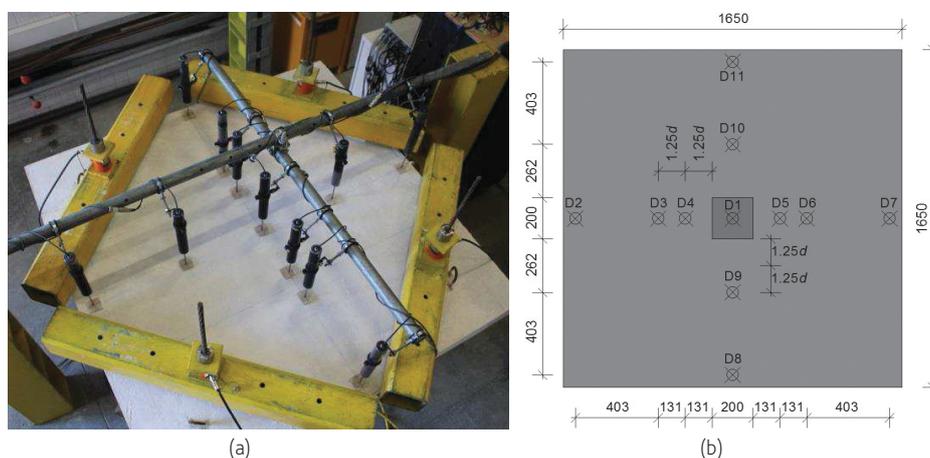


Figura 3 (a) Vista superior de um modelo. (b) Localização dos defletómetros (dimensões em mm)

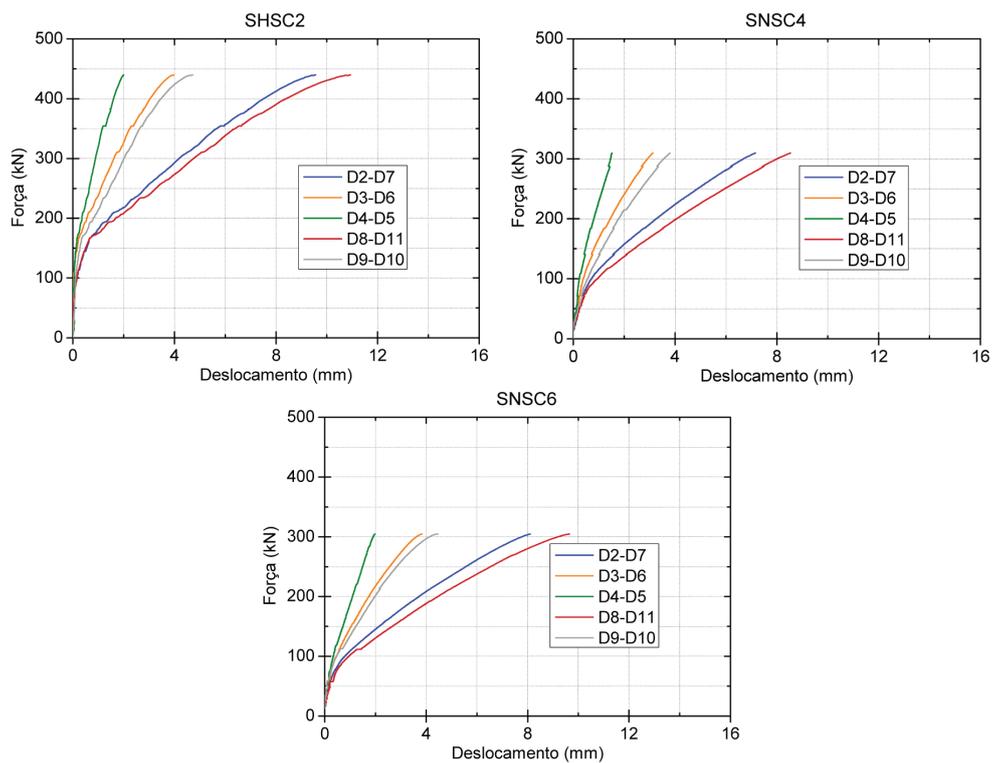


Figura 4 Evolução dos deslocamentos verticais dos modelos totalmente em BER ou betão convencional

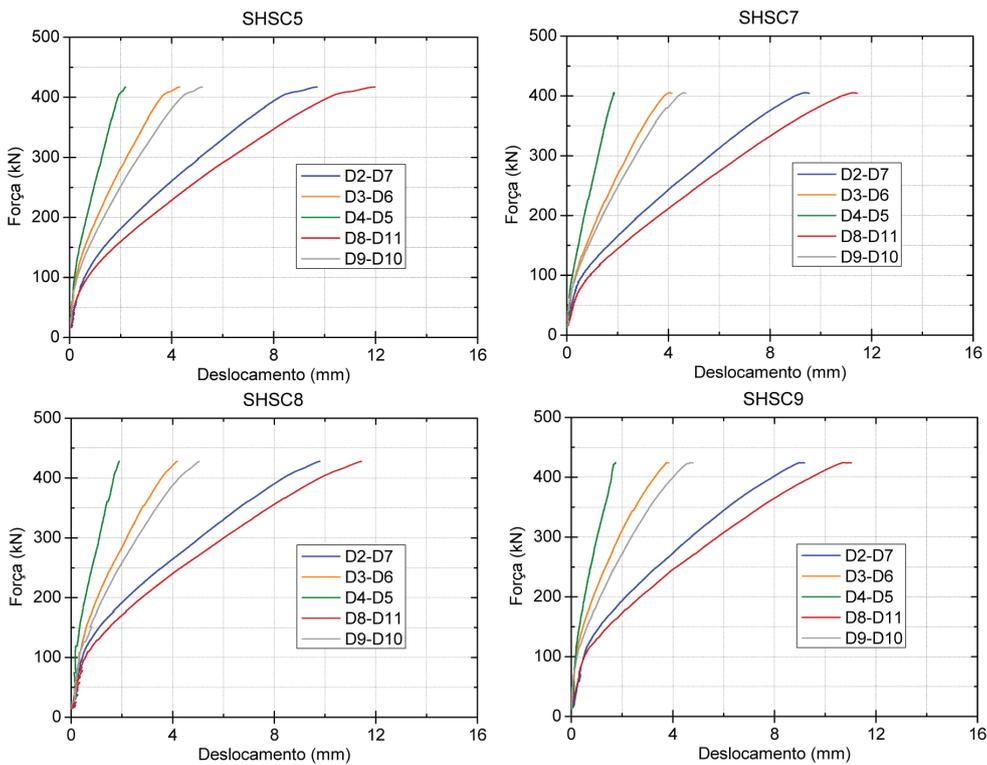


Figura 5 Evolução dos deslocamentos verticais dos modelos com utilização parcial de BER

O efeito da variação da resistência à compressão do betão normal usado nos modelos com utilização parcial de BER pode ser analisado comparando a evolução dos gráficos carga-deslocamento para os pares de modelos SHSC5-SHSC9 e SHSC7-SHSC8. Em termos de rigidez fendilhada não se verificam diferenças assinaláveis, mas quanto à energia de deformação, nos modelos em que o betão normal é mais resistente observa-se uma tendência para apresentarem uma quantidade ligeiramente superior de energia de deformação.

Comparando os resultados dos modelos SHSC8 e SHSC9, que apenas diferem na quantidade de BER utilizado, verifica-se que o modelo com maior volume de BER (SHSC9) apresenta um comportamento um pouco mais rígido na fase fendilhada. No entanto, o modelo SHSC9 apresentou uma energia de deformação ligeiramente inferior.

Os modelos com utilização parcial de BER apresentaram um aumento da rigidez fendilhada, em comparação com os modelos SNSC4 e SNSC6. A energia de deformação foi muito aumentada com a utilização racional de BER. No modelo SHSC7 verificou-se um aumento de 51%, em comparação com o modelo SNSC6, e nos modelos SHSC8 e SHSC9 registou-se um aumento médio de 86% em relação ao modelo de referência SNSC4. Os modelos com utilização parcial de BER apresentam valores de rigidez fendilhada e de energia de deformação idênticos aos obtidos no modelo SHSC2, totalmente em BER.

Quadro V Rigidez fendilhada, deformação na rotura e energia de deformação dos modelos

Parâmetro	Modelo						
	SHSC2	SNSC4	SHSC5	SNSC6	SHSC7	SHSC8	SHSC9
k_f (kN/mm)	32,2	29,1	31,2	26,9	31,2	30,7	32,6
Δ_y (mm)	10,9	8,5	12,0	9,6	11,4	11,4	11,0
V_{exp} (kN)	439	310	417	305	405	428	424
U (kN-mm)	3389	1695	3317	1938	2936	3202	3093

k_f – rigidez fendilhada da laje; Δ_y – deformada correspondente à carga de rotura da laje; V_{exp} – carga de rotura da laje; U – energia de deformação.

3.2 Capacidade de carga e comportamento na rotura

A Figura 6 mostra graficamente a carga de rotura dos vários modelos com utilização parcial de BER, dos modelos produzidos totalmente em betão normal e ainda do modelo idêntico totalmente em BER. Para facilitar a interpretação dos resultados, no gráfico de barras foi adicionada informação acerca das características de cada modelo, tais como a resistência à compressão dos betões utilizados no seu fabrico e a percentagem de BER utilizado, no caso dos modelos com utilização parcial de BER.

Todos os modelos atingiram rotura por punçoamento. Na Figura 7 são apresentadas fotografias da face superior do modelo SNSC6

imediatamente antes da rotura e da face inferior do modelo SHSC7 após atingir a carga a rotura.

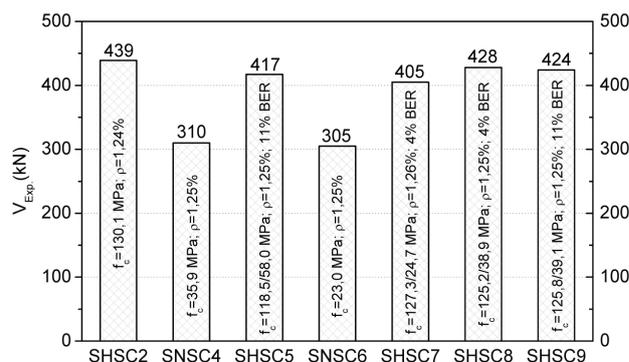


Figura 6 Carga de rotura dos modelos com utilização parcial de BER e dos modelos de referência

Os resultados obtidos nos ensaios experimentais mostram que a utilização parcial de BER na zona do pilar conduziu ao aumento significativo da capacidade resistente ao punçoamento dos modelos de laje fungiforme utilizados, com o incremento da capacidade de carga a atingir os 38%, em relação ao modelo produzido integralmente em betão convencional. Comparando os modelos com utilização parcial de BER com o modelo SHSC2, totalmente em BER, verifica-se um decréscimo médio da carga de rotura de somente cerca de 4,5% nos modelos com utilização parcial de BER.



Figura 7 (a) Vista superior do modelo SNSC6 antes da rotura. (b) Vista inferior do modelo SHSC7 após a rotura

Nos modelos com o betão convencional de resistência mais baixa (SNSC6 e SHSC7) foi registado o aumento da capacidade resistente em cerca de 33% com a utilização parcial de BER. No entanto, nos modelos similares onde foi utilizado betão convencional com resistência mais elevada (SNSC4 e SHSC8) verificou-se um aumento da carga de rotura em 38%. A qualidade do betão convencional utilizado na face tracionada dos modelos com utilização parcial de BER influenciou ligeiramente o desempenho das lajes ao punçoamento.

Quanto ao efeito da variação da geometria em planta da zona em BER, observa-se que os modelos SHSC8 e SHSC9 apresentaram comportamentos muito próximos, com o modelo com maior volume de BER a atingir a rotura para uma carga aplicada ligeiramente inferior (cerca de 1%). A diferença do valor da carga de rotura dos modelos referidos é justificada pela dispersão associada à realização de ensaios laboratoriais desta natureza.

Durante o ensaio dos vários modelos foi observado um padrão de fendilhação similar, com as primeiras fendas a serem circunferenciais e a surgirem junto às faces da zona carregada, desenvolvendo-se posteriormente fendas radiais junto ao contorno da zona carregada. Para valores de carga aplicada elevados surgiram fendas circunferenciais ao contorno da área carregada que originaram a superfície de rotura por punçoamento.

3.3 Superfície de rotura

Após o ensaio dos modelos procedeu-se ao seu corte nas duas direções perpendiculares. Na Figura 8 são apresentadas fotografias da superfície de rotura do modelo SHSC8 onde se pode verificar a integridade da ligação entre o BER e o betão convencional utilizado. Não se observou uma diferença acentuada de rugosidade da superfície de rotura entre as zonas de betão convencional e de BER, como se pode observar na Figura 9. Em nenhum dos modelos ensaiados se verificou deslizamento nas juntas de betonagem, tanto horizontal como verticais, o que comprova o comportamento monolítico da secção composta.



Figura 8 Vista pormenorizada da superfície de rotura do modelo SHSC8



Figura 9 Detalhes da superfície de rotura do modelo SHSC5

A Figura 10 mostra a vista em corte na direção perpendicular à armadura superior com maior altura útil. Foi registada a inclinação das superfícies de rotura com o plano da laje e os resultados médios são apresentados no Quadro VI.

Quadro VI Inclinação média da superfície de rotura dos modelos ensaiados

Modelo	SHSC2	SNSC4	SHSC5	SNSC6	SHSC7	SHSC8	SHSC9
$\alpha_{\text{médio}} (^{\circ})$	41°	25°	25°	32°	23°	23°	23°

A inclinação média da superfície de rotura dos modelos com utilização parcial de BER é da mesma ordem de grandeza dos valores obtidos nos modelos de referência, que foram produzidos totalmente em betão convencional. A inclinação média da superfície de rotura do modelo SHSC2, produzido totalmente em BER e com a mesma percentagem geométrica de armadura longitudinal superior, foi de 41°, substancialmente superior à inclinação registada nos modelos com utilização racional de BER.

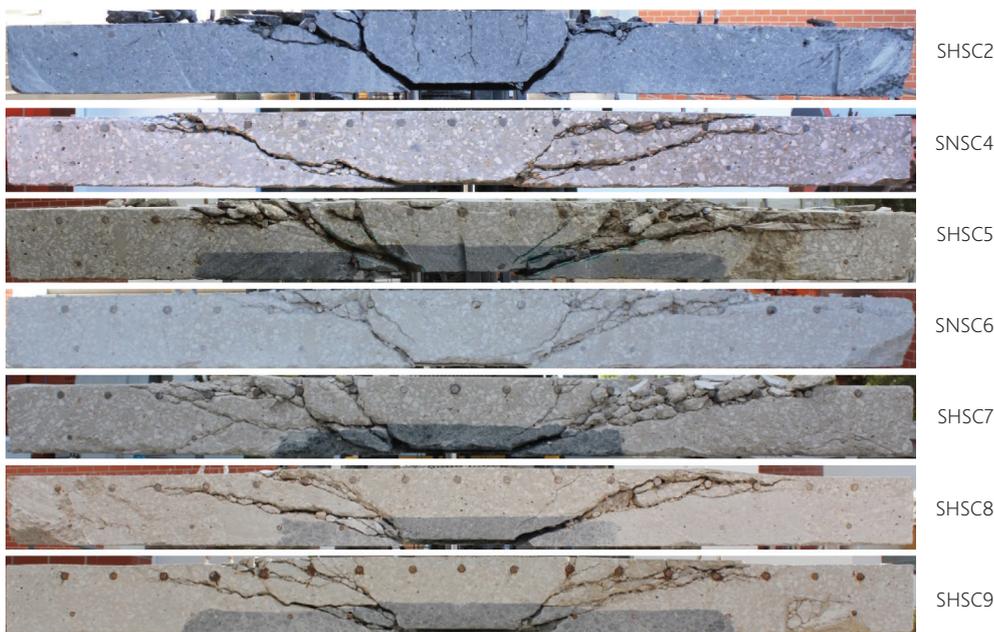


Figura 10 Vista da superfície de rotura dos modelos

4 Conclusões

Todos os modelos ensaiados atingiram a rotura por punçoamento. A utilização parcial de BER num volume de cerca de 4% do volume da laje levou ao aumento da resistência ao punçoamento até 38% comparando com o modelo homólogo em betão normal. Além disso, este valor é apenas ligeiramente inferior ao incremento de resistência de 42% verificado no modelo correspondente totalmente em BER. A variação da geometria em planta da zona em BER não originou diferenças relevantes na capacidade resistente dos modelos.

O comportamento carga-deformação dos modelos com utilização parcial de BER foi semelhante entre si, apesar das diferenças da geometria da zona em BER. Nos modelos com aplicação parcial de BER observou-se uma maior energia de deformação, quando comparados com os modelos de referência, totalmente em betão convencional.

Agradecimentos

Os ensaios descritos neste artigo foram realizados no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Este trabalho recebeu ainda apoio da Fundação para a Ciência e a Tecnologia – Ministério da Educação e Ciência através do Projeto EXPL/ECM – EST/1371/2013 e da Bolsa de Doutoramento SFRH/BD/76242/2011.

Manifestamos igualmente reconhecimento à CIMPOR, SIKA e VSL pela cedência de materiais e equipamentos para a produção e ensaio dos modelos.

Referências

- [1] Hallgren, M. – "Punching Shear Capacity of Reinforced High Strength Concrete Slabs", Department of Structural Engineering, Royal Institute of Technology, 1996.
- [2] Zohrevand, P.; Yang, X.; Jiao, X.; Mirmiran, A. – "Punching Shear Enhancement of Flat Slabs with Partial Use of Ultrahigh-Performance Concrete", *Journal of Materials in Civil Eng.*, pp. 1-10, 2015.
- [3] Bastien-Masse, M.; Brühwiler, E. – "Experimental investigation on punching resistance of R-UHPFRC-RC composite slabs", *Materials and Structures*, 2015.
- [4] Faria, D.; Biscaia, H.; Lúcio, V.; Ramos, A. – "Material and Geometrical Parameters Affecting Punching of Reinforced Concrete Flat Slabs with Orthogonal Reinforcement", in *fib Symposium PRAGUE 2011 – Concrete Engineering for Excellence and efficiency*, 2011, pp. 1-4.
- [5] IPQ – NP EN 12390-3 – Ensaio do betão endurecido – Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio. Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica, Portugal, p. 21, 2003.
- [6] IPQ – NP EN 12390-6 – Ensaio do betão endurecido – Parte 6: Resistência à tração por compressão de provetes. Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica, Portugal, p. 14, 2003.
- [7] LNEC – E397 – Determinação do módulo de elasticidade em compressão. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, p. 2, 1993.
- [8] IPQ – NP EN 10002-1 – Materiais metálicos. Ensaio de tração – Parte 1: Método de ensaio. Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica, Portugal, p. 35, 1990.

