

# UTILIZAÇÃO RACIONAL DE BEDRF EM LIGAÇÕES LAJE-PILAR



António Pinho Ramos  
Professor Associado  
FCT NOVA / CERIS  
Caparica  
ampr@fct.unl.pt



Brisid Isufi  
Investigador  
FCT NOVA / CERIS  
Caparica  
b.isufi@campus.fct.unl.pt



Carla Marchão  
Professora Auxiliar  
FCT NOVA / CERIS  
Caparica  
c.marchao@fct.unl.pt



Rui Marreiros  
Professor Auxiliar  
FCT NOVA / CERIS  
Caparica  
rpm@fct.unl.pt

## SUMÁRIO

Este artigo descreve um programa experimental com o objectivo de estudar o comportamento da ligação laje-pilar em lajes fungiformes de betão de elevado desempenho reforçado com fibras (BEDRF) sujeitas a um carregamento gravítico monotónico. Com vista à optimização da utilização de BEDRF, os modelos experimentais foram projetados e produzidos utilizando o BEDRF numa zona limitada da laje, junto ao pilar, sendo o restante produzido com um betão convencional. Foram ensaiados cinco modelos, incluindo uma laje de referência totalmente de betão convencional, onde se fizeram variar a percentagem de armadura longitudinal (0,6% e 1,0%) e a dimensão da área betonada com BEDRF (1,5 a 3 vezes a altura útil da laje, medidos a partir da face do pilar). Os resultados obtidos mostram que a utilização de BEDRF em ligações laje-pilar resulta num aumento significativo da carga de fendilhação e da capacidade de carga e deformação na rotura. Estes benefícios são efectivos mesmo nos modelos com menor área de BEDRF.

**Palavras-chave:** ligação laje-pilar; laje fungiforme; punçoamento; betão de elevado desempenho reforçado com fibras (BEDRF).

## 1. INTRODUÇÃO

A rotura por punçoamento é o modo de rotura muito frequentemente condicionante no dimensionamento de lajes fungiformes. Duas possíveis soluções para aumentar a resistência

ao punçoamento são o aumento da espessura da laje (em todo o piso ou apenas nas proximidades do pilar) e a adopção de armadura de punçoamento. A primeira leva a um aumento do consumo de materiais devido ao aumento do volume de betão, mas também indiretamente devido ao aumento do peso e da massa do edifício, o que conduz a solicitações acrescidas na estrutura. A última solução tem-se mostrado muito eficaz no aumento da resistência ao punçoamento de lajes fungiformes, mas apresenta os inconvenientes de ser de difícil execução e propensa a erros, levando a um aumento do congestionamento de armaduras na zona junto ao pilar e, conseqüentemente, dificuldades acrescidas na betonagem. Além do problema do punçoamento, o dimensionamento das lajes fungiformes é geralmente condicionado pelo comportamento em serviço, e em particular pela deformação, não sendo a armadura de punçoamento eficaz para este caso.

Com o desenvolvimento de novos materiais cimentícios, surgiram novas possibilidades para melhorar o comportamento ao punçoamento de lajes fungiformes. Os Betões de Elevado Desempenho Reforçados com Fibras (BEDRF), por exemplo, oferecem em simultâneo as vantagens dos Betões de Elevado Desempenho (BED) e dos Betões Reforçados com Fibras (BRF), ou seja, apresentam uma maior resistência à tracção e à compressão do que um betão convencional, maior durabilidade e também frequentemente um melhor desempenho em termos de auto-compacção, o que reduz os custos de mão de obra associados à vibração do betão.

Na década de 1980 e início de 1990 surgiram os primeiros trabalhos de investigação sobre a utilização de materiais cimentícios avançados em lajes fungiformes, com o objectivo de melhorar o comportamento ao punçoamento. Destacam-se os trabalhos de Swamy e Ali [1], Narayanan e Darwish [2] em BRF e Marzouk e Hussein [3] em BED, embora também existam trabalhos anteriores em modelos de pequena escala. Os primeiros estudos mostraram que o uso de BED e BRF tem grande potencial para aumentar a resistência ao punçoamento e melhorar o desempenho geral de lajes fungiformes sujeitas a carregamentos gravíticos.

Uma das principais conclusões da extensa revisão da literatura sobre a aplicação de BRF e BED em lajes fungiformes, que pode ser encontrada em Isufi e Ramos [4], é que a combinação de BRF com BED não foi ainda suficientemente explorada em lajes fungiformes. Tal combinação é potencialmente benéfica para lajes fungiformes submetidas a punçoamento, pois a alta resistência do betão pode levar a um aumento da resistência ao esmagamento do betão, enquanto a presença de fibras de aço pode reduzir e controlar a fendilhação interna, ambas levando a um aumento da capacidade de resistência ao punçoamento. Estudos experimentais que estudaram essa possibilidade incluem Chanthabouala et al. [5], em que foi utilizada um BRF com resistência à compressão acima de 80 MPa em lajes de 150 mm de espessura ensaiadas sob carga gravítica, e Ozden et al. [6] que testaram lajes circulares com 120 mm de espessura e 1,5 m de diâmetro. Além destes, também podem ser encontrados na literatura ensaios em lajes de pequena escala (espessura abaixo de 100 mm).

O presente trabalho estuda o comportamento de lajes mistas de grande porte sujeitas a punçoamento com uso híbrido de betão convencional e betão de elevada resistência reforçado com fibras. Devido às especificidades deste último, que não estão apenas relacionadas com a resistência à compressão, mas também com o desempenho em geral

(durabilidade, comportamento à tração, propriedades de auto-compactação), este material passa a ser chamado de Betão de Elevado Desempenho Reforçado com Fibras (BEDRF) daqui em diante. Para aproveitar ao máximo as suas características e contrabalançar o seu alto custo, o uso híbrido de BEDRF neste trabalho visa reduzir a sua quantidade utilizada, e é motivado por pesquisas anteriores em lajes de BED [7,8], lajes de BRF [1,9 –11] e lajes de betão de ultra-elevado desempenho [12].

## 2. DESCRIÇÃO DO BEDRF

O BEDRF utilizado neste trabalho de investigação foi especificamente desenvolvido para este fim por Nunes et al. [13] e apresentado também em Blazy et al. [14]. A composição da mistura apresenta-se no Quadro 1. A mistura inclui dois tipos de fibras de aço (mistura híbrida): fibras longas com 0,9 mm de diâmetro e 60 mm de comprimento e fibras retas com 0,2 mm de diâmetro e 13 mm de comprimento, com percentagem volumétrica  $V_f = 1\%$  (0,5% correspondendo às fibras longas e 0,5% às fibras curtas). Esta mistura foi escolhida após uma extensa campanha experimental descrita em [13], que mostrou que a mistura binária utilizada neste estudo teve o melhor desempenho (maior abertura de fenda com carga máxima no “*Wedge-Splitting Test*” e boas propriedades de auto-compactação).

Quadro 1. Composição do BEDRF

Materiais	Quantidades [kg/m <sup>3</sup> ]
Cimento CEM I 42.5R	531,86
Filer calcário	203,72
Sílica de fumo	53,19
Água	147,85
Superplastificante	12,55
Agregados finos	811,82
Agregados grossos	721,43
Fibras de aço (compridas)	39,25
Fibras de aço (curtas)	39,25

Com base em [13], onde é fornecida a caracterização detalhada do material, o BEDRF desenvolvido apresenta uma resistência à compressão para cubos de 150 mm de largura de cerca de 125 MPa e para cilindros de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura de 114 MPa aos 28 dias. O comportamento à flexão foi caracterizado por Nunes et al. [13] utilizando um ensaio de flexão de três pontos, tendo sido obtido uma tensão limite de proporcionalidade igual a  $f_L = 10$  MPa e valores de tensões residuais resistentes iguais a  $f_{R1} = 15,4$  MPa,  $f_{R2} =$

18,0 MPa,  $f_{R3} = 16,4$  MPa and  $f_{R4} = 12,9$  MPa, correspondentes respetivamente a deslocamentos de abertura da boca da fenda ("crack mouth opening displacement") de 0,5 mm, 1,5 mm, 2,5 mm e 3,5 mm.

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 3.1 Descrição dos modelos

Consideraram-se cinco modelos com espessura de 150 mm e forma octogonal, com dimensões em planta máximas de 2200 mm por 2200 mm. As principais variáveis consideradas foram a percentagem de armadura de flexão  $\rho_L$  (0,6 % e 1,0%) e a dimensão da zona de BEDRF (600 mm e 960 mm), o que corresponde a uma extensão de 1,5d e 3,0d da face do pilar, onde d é a altura útil média da armadura longitudinal superior. Conforme ilustrado na Figura 1, foram produzidos dois modelos com diferentes dimensões de BEDRF para cada percentagem geométrica de armadura. Foi ainda betonado um modelo de referência para  $\rho_L = 0,6$  % (sem BEDRF). Para  $\rho_L = 1,0$  % considerou-se um modelo previamente ensaiado num trabalho anterior.

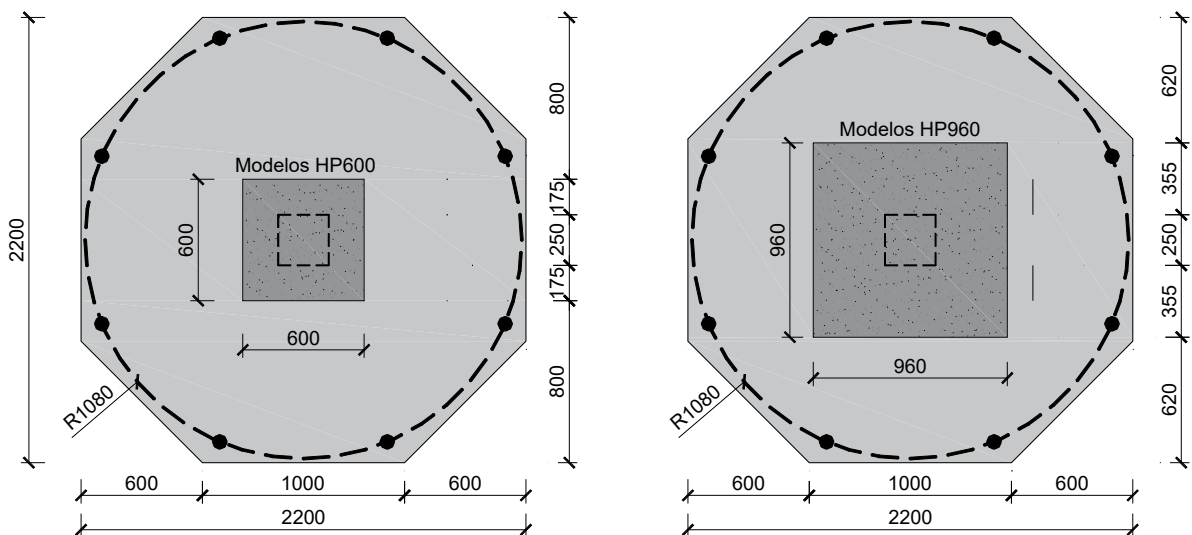


Figura 1. Geometria dos modelos (dimensões em mm).

As designações utilizadas para os modelos seguiram a seguinte convenção: "HP" (representa HPFRC, nomenclatura inglesa para BEDRF) seguido da largura da zona de BEDRF (em milímetros), seguido pela letra "R" (para armadura) e pela percentagem de armadura de flexão. Por exemplo, o modelo HP960\_R0.6 é um modelo com uma região quadrada de BEDRF de 960 mm e percentagem de armadura de flexão de 0,6%.

Adoptaram-se armaduras com diâmetros de 12 mm e 10 mm, para as malhas superior e inferior, respetivamente, conforme ilustrado na Figura 2. Conforme usualmente adoptado na pormenorização de lajes fungiformes, adoptou-se um espaçamento dos varões da armadura superior na zona do pilar (até uma largura de aproximadamente 3 vezes a altura útil a partir da face do pilar) menor em relação à restante largura. O recobrimento nominal especificado foi de 20 mm. No Quadro 2 apresenta-se a altura útil exata, d, dos varões da armadura

superior medida imediatamente antes da betonagem, as percentagens médias da armadura de flexão superior  $\rho_L$  (calculadas com base no Eurocode 2 [15]) e a largura da zona de BEDRF expressa em valor e também como um múltiplo de  $d$  medido a partir da superfície do pilar.

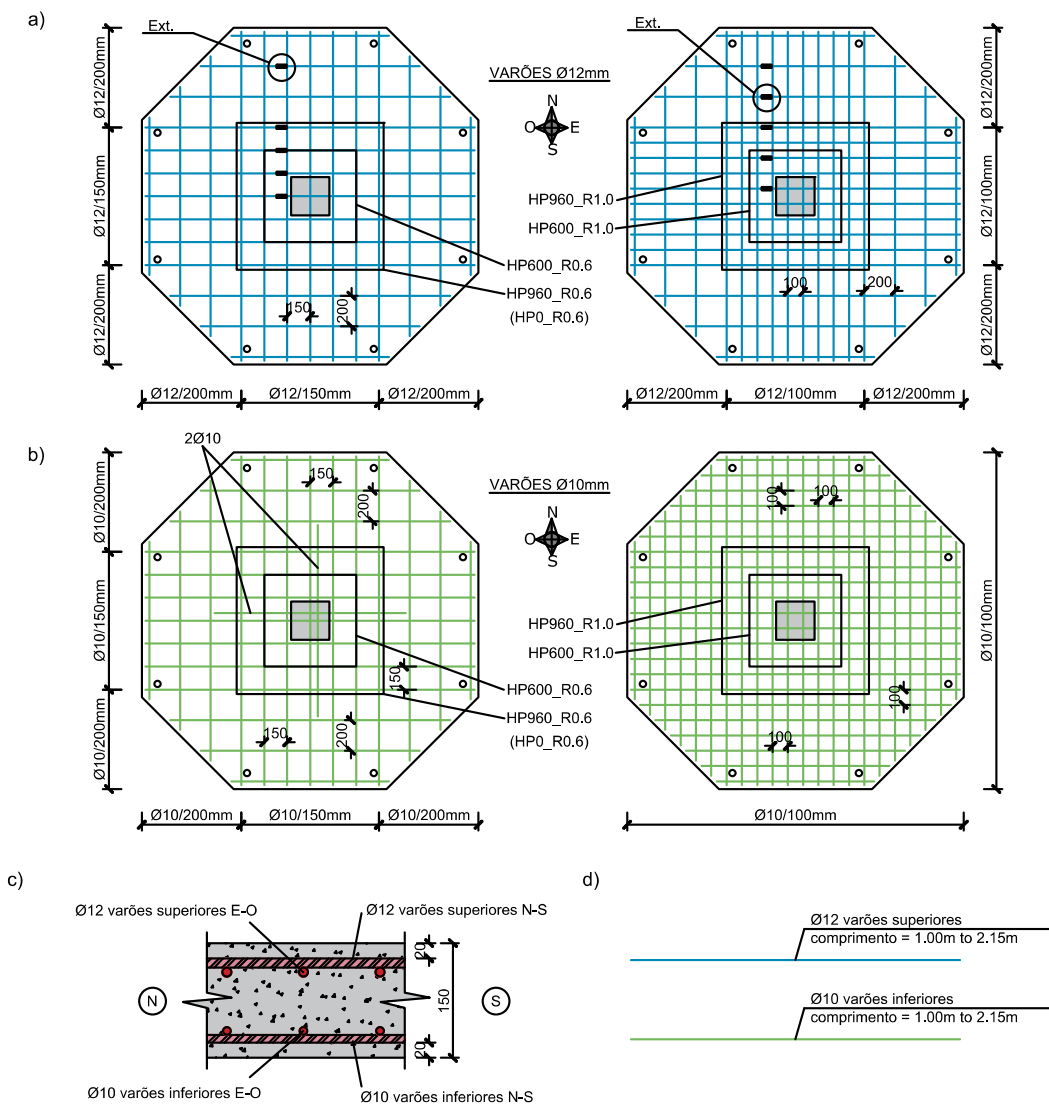


Figura 2. Armaduras de flexão: a) Armaduras superiores; b) armaduras inferiores; c) corte; d) pormenor da armadura.

Quadro 2. Características dos modelos

Modelo	d (mm)	$\rho_L$ (%)	Largura de BEDRF $C_{BEDRF}$ (mm)	Extensão de BEDRF (d)
HP0_R0.6	117,7	0,64	0	0d
HP600_R0.6	118,4	0,64	600	1,5d
HP960_R0.6	118,0	0,64	960	3,0d
HP600_R1.0	117,5	0,96	600	1,5d
HP960_R1.0	117,9	0,96	960	3,0d

Os modelos foram betonados “in situ”, nas instalações da Nova School of Science and Technology (Figura 3). Para a execução dos modelos com diferentes betões (betão convencional e BEDRF), foi necessária a utilização de uma malha fina de aço galvanizado (diâmetro 0,5 mm e formato quadrado, com dimensão da malha de 13 mm) na interface entre as duas zonas, fixada aos varões das armaduras superior e inferior. Tendo em conta as propriedades do BEDRF, nomeadamente as suas propriedades de auto-compactação, bem como o tempo de presa relativamente curto, optou-se por betonar primeiro a zona exterior (betão convencional) e logo a seguir o BEDRF (Figura 3). Após a betonagem, os modelos foram cobertos com uma membrana geotêxtil húmida e uma folha plástica por, pelo menos, 7 dias para evitar a perda excessiva de água por evaporação.



**Figura 3. Betonagem dos modelos: a) Armaduras, cofragem e malha de aço galvanizado; b) laje acabada.**

### **3.2 Sistema de ensaio e monitorização**

Os modelos representam a região de momento negativo de uma laje fungiforme com vãos iguais em ambas as direções ortogonais, apoiada em pilares quadrados de 250 mm. O sistema de ensaio está representado na Figura 4. Para aplicar o carregamento utilizou-se um macaco hidráulico, na zona central da laje, com capacidade de 1000 kN e curso máximo de 153 mm. A carga foi aplicada a uma taxa de, aproximadamente, 150 N/s. O modelo da laje foi fixado à laje do laboratório utilizando um sistema de quatro vigas de distribuição e oito cordões de pré-esforço, conforme ilustrado na Figura 4. Para medir a carga aplicada ao longo do ensaio, foram instaladas no topo da laje oito células de carga, junto aos cordões de pré-esforço, ao longo do perímetro do modelo. Utilizaram-se onze transdutores de deslocamentos dispostos ao longo de dois eixos ortogonais para medir os deslocamentos verticais na face superior da laje, e cinco adicionais na face inferior, conforme ilustrado na Figura 5.

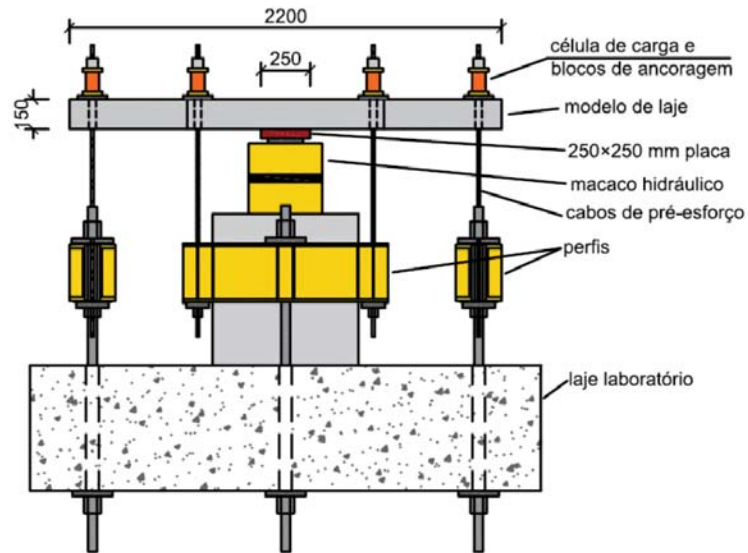


Figura 4. Esquema de ensaio (unidades: mm).

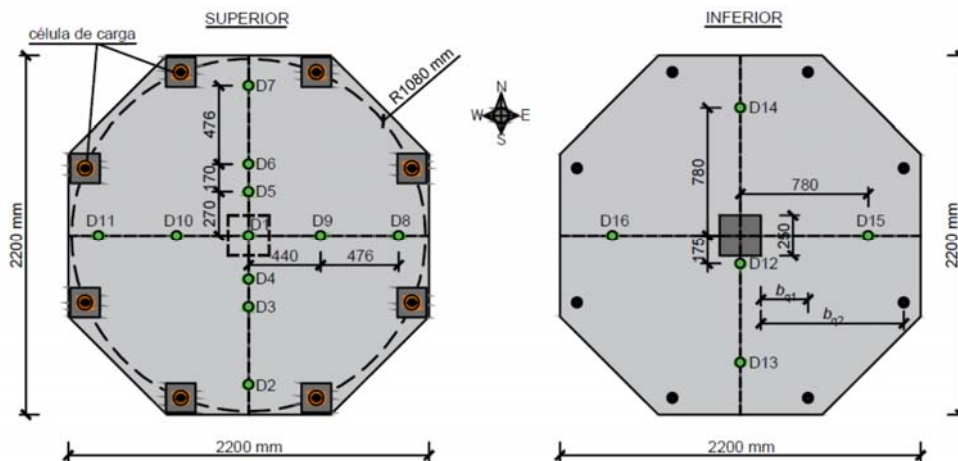


Figura 5. Instrumentação: células de carga e transdutores de deslocamentos (unidades: mm).

### 3.3 Materiais

Para a caracterização das propriedades mecânicas do betão efectuaram-se ensaios de compressão em cubos com 150 mm de aresta e cilindros com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Os cilindros foram também previamente utilizados para determinação do módulo de elasticidade do betão. A resistência à tracção do betão convencional foi determinada através de ensaios de compressão diametral em três cilindros, para cada modelo.

Relativamente à caracterização do BEDRF, embora tenha sido apresentada uma caracterização detalhada em trabalhos anteriores [13, 14], foram realizados ensaios de compressão em cubos e cilindros normalizados, e em cubos de 100 mm de aresta nos casos em que a resistência à compressão dos cubos de 150 mm de aresta ultrapassava a capacidade da máquina de compressão.

Os valores obtidos nestes ensaios encontram-se resumidos no Quadro 3.



**Quadro 3. Propriedades mecânicas do betão**

Modelo	Betão convencional				BEDRF			
	$f_{c,cube150}$ (MPa)	$f_c$ (MPa)	$f_{ct,sp}$ (MPa)	$E$ (GPa)	$f_{c,cube150}$ (MPa)	$f_{c,cube100}$ (MPa)	$f_c$ (MPa)	$E$ (GPa)
HP0_R0.6	25,4	24,4	2,2	29,0	N/A*	N/A	N/A	N/A
HP600_R0.6	25,2	27,5	2,2	29,5	120,0	N/A	126,1	51,5
HP960_R0.6	30,1	26,0	2,5	27,5	129,5	130,1	127,7	49,7
HP600_R1.0	28,1	24,6	2,2	25,1	N/A	126,6	123,9	49,3
HP960_R1.0	23,8	25,5	2,3	25,6	N/A	124,0	118,1	N/A

N/A\* - Não aplicável / Não disponível

As armaduras utilizadas na face superior, tinham uma tensão de cedência de  $f_y = 547$  MPa e uma resistência última de  $f_u = 642$  MPa.

## 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 4.1 Fendilhação e modos de rotura

O modelo de referência (HP0\_R0.6) apresentou, ao longo do ensaio, um desenvolvimento da fendilhação típico de lajes fungiformes submetidas a cargas de punçoamento: após a carga de fendilhação (aprox. 60 kN) surgiram fendas de flexão radiais que aumentaram de forma constante ao longo do ensaio. Com o aumento da carga, formaram-se novas fendas na face superior e as existentes aumentaram. A face inferior não sofreu nenhum dano perceptível até à ocorrência da rotura por punçoamento, caracterizado por uma intrusão da chapa de aço de apoio na laje. O corte deste modelo mostra uma rotura típica de punçoamento (Figura 6).

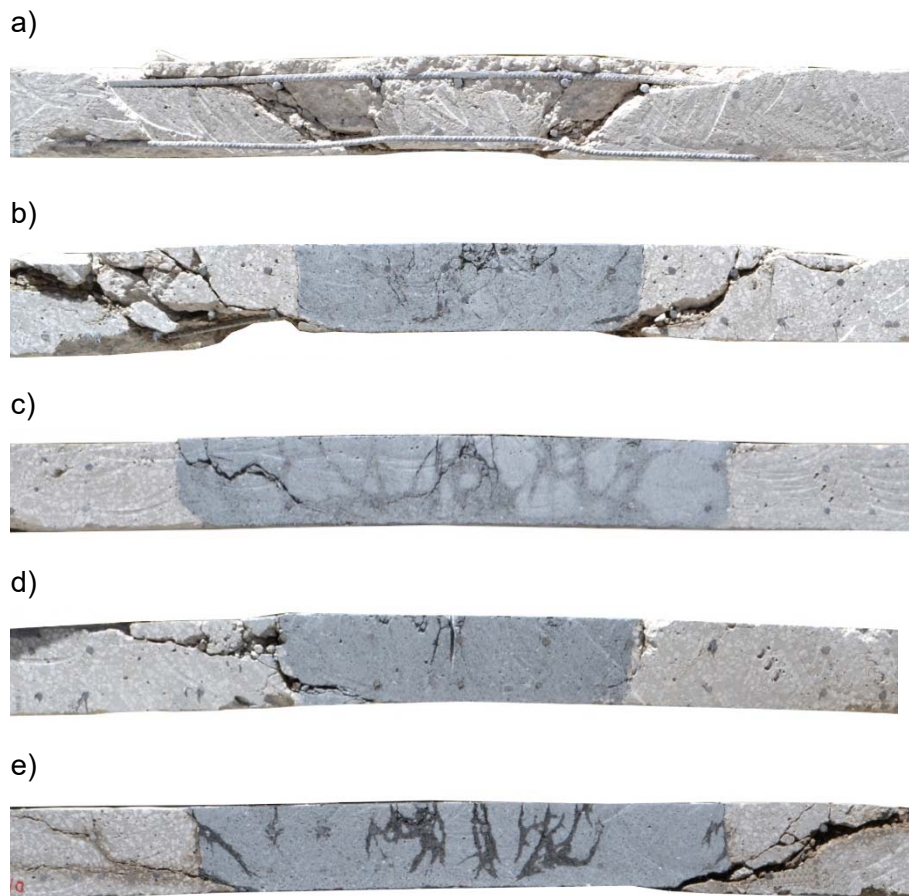
Para todos os modelos com BEDRF, a fendilhação surgiu mais tarde do que no modelo de referência HP0\_R0.6, mas após o aparecimento da primeira fenda, o desenvolvimento das novas fendas foi semelhante para todos. Em relação às fendas observadas, algumas permaneceram apenas dentro da zona do BEDRF, outras cruzaram a região central do BEDRF e estenderam-se até à extremidade da laje. Conforme esperado, os modelos com menor taxa de armadura de flexão apresentaram mais fendas para o mesmo nível de carregamento. A superfície inferior dos modelos com BEDRF não sofreu nenhum dano visível até muito próximo da rotura.

No modelo HP600\_R0.6, surgiu uma fenda de corte fora da zona BEDRF, de um dos lados. Devido à provável redistribuição da carga após o início desta fenda, o esmagamento da face inferior do modelo ocorreu na direção NO – SE antes da propagação da fenda de corte ao redor do perímetro da região do BEDRF. A linha de rotura na face inferior cruzou a região de BEDRF, com desvio causado pela presença do apoio. Os cortes apresentados na Figura 6 fornecem informações adicionais sobre a rotura do HP600\_R0.6. Perto do varão da armadura no lado norte, a fenda cruzou a zona de BEDRF, enquanto nas outras direcções a rotura



variou entre rotura por corte fora da zona de BEDRF e uma combinação de danos por flexão e fendas de corte.

Antes da rotura do modelo HP960\_R0.6 desenvolveram-se fendas de flexão significativas dentro da região de BEDRF. Ocorreu uma rotura prematura por punçoamento num dos apoios, no perímetro do modelo, num nível de carga que excedeu a carga de rotura do modelo semelhante, mas com uma região de BEDRF menor (HP600\_R0.6). O corte apresentado na Figura 6 mostra que houve uma fenda de corte significativa no lado norte dentro da zona de BEDRF, indicando que o modelo estava próximo da rotura, tendo sido esta fenda eficientemente controlada pelas fibras de aço, enquanto a fenda fora da zona de BEDRF enfraqueceu a região do apoio e provavelmente foi a causa da rotura junto à extremidade do modelo.



**Figura 6. Cortes dos modelos na direcção N-S: a) HP0\_R0.6; b) HP600\_R0.6; c) HP960\_R0.6; d) HP600\_R1.0; e) HP960\_R1.0.**

Nos dois modelos com maior taxa de armadura de flexão (HP600\_R1.0 e HP960\_R1.0) foram adicionadas oito chapas de aço sob as células de carga para evitar roturas na extremidade dos modelos. Em ambos a fenda de corte ocorreu fora da região de BEDRF. No modelo com menor largura de BEDRF, a fenda afetou três lados do perímetro exterior da zona de BEDRF. A delaminação do recobrimento de betão é visível na face superior, em três lados do perímetro, à semelhança de uma rotura típica de punçoamento com grande perímetro. O perímetro da

fenda não foi fechado (a fenda prolongou-se por três lados do pilar quando o ensaio foi interrompido).

No modelo HP960\_R1.0, a capacidade de redistribuição da força de corte ao longo do perímetro fora da zona de BEDRF foi ainda mais limitada devido ao seu grande perímetro. Isso levou, neste modelo, a uma rotura por corte semelhante a corte unidirecional. No entanto, o corte apresentado na Figura 6 ao longo da direção N-S (ao longo do qual as armaduras tinham maior altura útil) mostra que uma fenda de corte se desenvolveu também no lado sul, oposto ao lado em que ocorreu a rotura visível que levou ao final do ensaio.

Além disso, os cortes apresentados na Figura 6 mostram que a solução utilizada para a materialização da interface entre o BEDRF e o betão convencional foi eficiente, apresentando um bom comportamento na ligação entre os dois betões. Na face inferior da zona de BEDRF em alguns modelos são visíveis pequenas imperfeições devido à vibração do betão convencional que levou a alguma intrusão do betão convencional na zona que deveria se apenas de BEDRF.

## 4.2 Relações carga-deslocamento

Na Figura 7 apresentam-se as curvas carga ( $V$ ) – deslocamento ( $u$ ) para todos os modelos, comparando cada conjunto de modelos com BEDRF com seu respectivo modelo de referência em betão convencional. É de salientar que o modelo de referência F0\_R1.0, publicado anteriormente em Gouveia et al. [9], era idêntico aos modelos HP600\_R1.0 e HP960\_R1.0, exceto que era inteiramente composto por betão convencional com resistência à compressão de 66,3 MPa. A altura útil de F0\_R1.0 medida antes da betonagem era de 117,5 mm [9].

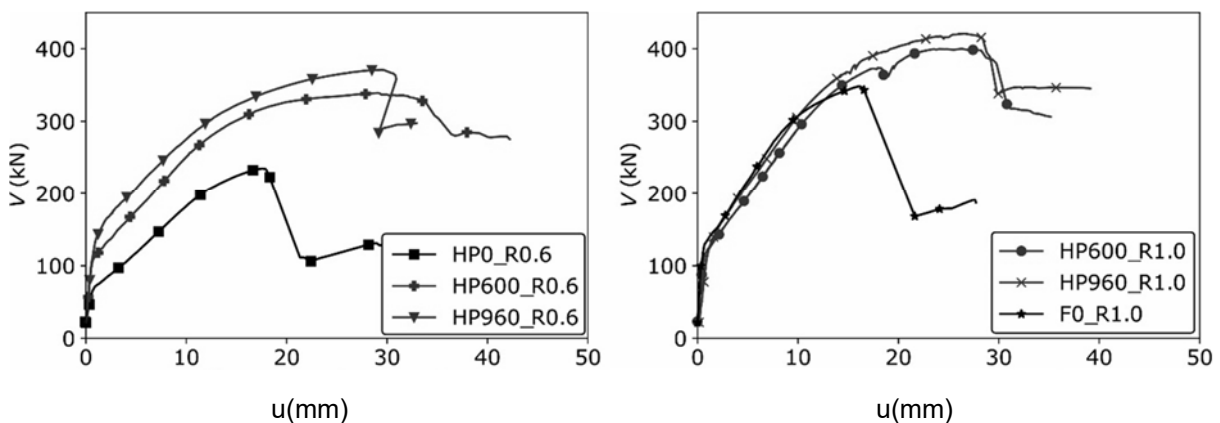


Figura 7. Relações carga-deslocamento

Na Figura 7, o deslocamento  $u$  foi obtido como a leitura relativa entre o transdutor de deslocamento central no topo da laje (D1, ver Figura 5) e a leitura média dos transdutores de deslocamento mais distantes do centro (D2, D7, D8 e D11, ver Figura 5). A carga  $V$  foi obtida como a soma das medições das oito células de carga no topo da laje, mais o peso próprio do modelo e dos restantes componentes do sistema de ensaio. Deste modo, na Figura 7, as curvas começam num nível de carga igual ao peso próprio.

Os principais resultados, incluindo cargas experimentais máximas  $V_{exp}$ , deslocamentos correspondentes  $u_{max}$  e modo de rotura estão resumidos no Quadro 4.

**Quadro 4. Resultados principais (força máxima e deslocamento respectivo e modo de rotura)**

Modelo	$V_{exp}$ (kN)	$u_{max}$ (mm)	Modo de Rotura
HP0_R0.6	235,0	17,6	Punçoamento
HP600_R0.6	338,9	29,0	Combinação de corte fora do perímetro de BEDR, com corte dentro do perímetro e flexão
HP960_R0.6	370,9	29,2	Corte dentro da zona de BEDRF (limitado por punçoamento num canto do modelo)
HP600_R1.0	399,9	26,4	Punçoamento fora da zona de BEDRF
HP960_R1.0	420,1	26,5	Corte unidirecional fora da zona de BEDRF

A Figura 7 e o Quadro 4 mostram que o papel do BEDRF teve triplo efeito nos modelos com menor percentagem de armadura de flexão (modelos R0,6): aumentou a rigidez pós-fendilhação, a capacidade de carga final dos modelos, bem como o deslocamento máximo. Em relação aos modelos com percentagem de armadura de flexão de 0,6%, a capacidade de carga foi aumentada em 44% para uma largura de zona de BEDRF de 600 mm e aproximadamente 58% para o outro modelo (HP960\_R0.6) com uma zona de BEDRF maior. A significativa rigidez pós-fendilhação significa que a aplicação de BEDRF também pode ser benéfica para mitigar problemas em serviço de lajes fungiformes.

Comparando os dois conjuntos de modelos, percebe-se que as diferenças entre o modelo de referência e os modelos com BEDRF são superiores nos modelos com menor percentagem de armadura de flexão. Para os modelos com maior percentagem de armadura, as diferenças de capacidade de carga entre a laje de referência e as lajes com BEDRF são menores, também porque o modelo F0\_R1.0 (modelo de referência) apresentou uma resistência à compressão relativamente alta para o betão convencional (66,3 MPa, conforme anteriormente referido). Neste caso, a capacidade dos modelos com BEDRF foi aumentada em 15% e 21% (HP600\_R1.0 e HP960\_R1.0 respectivamente).

Em relação aos modelos com BEDRF, e com diferentes tamanhos da zona de BEDRF, observa-se que os modelos com maior zona de BEDRF apresentaram maior capacidade de carga. No entanto, o aumento da capacidade de carga foi pequeno: aproximadamente 9% nos modelos R0.6 e aproximadamente 5% nos modelos R1.0. Uma explicação provável para este resultado é o facto de que a cedência por flexão ocorreu nas proximidades do pilar. Além disso, especialmente nos modelos com maior área de HPFRC, a fendilhação por flexão enfraqueceu os cantos dos modelos e alguma interação com o sistema de ensaio pode ter contribuído para este resultado.

## 5. CONCLUSÕES

Foram realizados cinco ensaios de punçoamento monotónico centrado em modelos de laje fungiforme, com percentagens de armadura de flexão e largura da zona em BEDRF nas proximidades do pilar, variáveis. Os ensaios procuraram aferir a possibilidade de melhorar o desempenho de modelos híbridos de lajes fungiformes de grande escala constituídos por betão convencional e BEDRF. As principais conclusões que resultaram deste estudo foram as seguintes:

1. A utilização de BEDRF com resistência à compressão de, aproximadamente, 125 MPa e percentagem volumétrica de 1% de fibras (mistura híbrida de 0,5% correspondente a fibras longas e 0,5% correspondente a fibras retas curtas) aplicado em pelo menos 1,5d da face da coluna foi suficiente para aumentar significativamente a capacidade de carga dos modelos (cerca de 40% para o modelo HP600\_R0.6 em comparação com o modelo de referência HP600\_R0).
2. A utilização de BEDRF resultou com sucesso no aumento da capacidade de carga para ambas as percentagens de armadura de flexão consideradas neste trabalho de investigação: 0,6% e 1,0%.
3. A utilização de BEDRF alterou o modo de rotura dos modelos forçando a fenda de punçoamento a ir para fora da zona de BEDRF para os modelos com maior percentagem de armadura de flexão. Para os modelos com menor percentagem de armadura de flexão, o BEDRF foi também capaz de reduzir a fragilidade da rotura por corte, controlando efetivamente a fenda de corte, adiando assim a rotura.
4. Além de aumentar a capacidade de carga, o BEDRF retardou a fendilhação inicial dos modelos. A solução utilizada neste trabalho é, portanto, benéfica para o dimensionamento ao Estado Limite de Serviço de lajes fungiformes, embora o BEDRF tenha sido aplicado apenas numa região limitada próxima do pilar de apoio.
5. Comparando modelos com a mesma percentagem de armadura de flexão, mas com diferentes tamanhos da zona de BEDRF, o aumento da capacidade de carga foi bastante limitado, na faixa dos 5% a 10% com o BEDRF estendendo-se de 1,5d a 3,0d da face do pilar (que corresponde a um aumento de 2,56 vezes no consumo de BEDRF), resultando numa relação custo-benefício baixa.

## REFERÊNCIAS

- [1] Swamy R.N., Ali S.A.R. – “Punching Shear Behavior of Reinforced Slab-Column Connections Made with Steel Fiber Concrete”, *ACI J Proc*, 1982, 79 p.
- [2] Narayanan R, Darwish IYS. “Punching shear tests on steel-fibre-reinforced micro-concrete slabs”, *Mag Concr Res*, Vol. 39,1987, p. 42–50.
- [3] Marzouk H, Hussein A. – “Experimental investigation on the behaviour of high-strength concrete slabs”. *ACI Struct J* 1991, p. 701–13.
- [4] Isufi B, Pinho Ramos A. – “A review of tests on slab-column connections with advanced concrete materials”. *Structures*, Vol. 32, 2021,p. 849–60.

- [5] Chanthabouala K., Teng S., Chandra J., Tan K.-H., Ostertag C.P. – “Punching Tests of Double-Hooked-End Fiber Reinforced Concrete Slabs”, *ACI Struct J*, Vol. 115, 2018.
- [6] Ozden S, Ersoy U, Ozturan T. – Punching shear tests of normal- and high-strength concrete flat plates. *Can J Civ Eng*, Vol. 33, 2006, p.1389–400.
- [7] Inácio M, Lapi M, Pinho Ramos A. – Punching of reinforced concrete flat slabs – Rational use of high strength concrete. *Eng Struct*, Vol. 206, 2020.
- [8] Hallgren M. *Punching Shear Capacity of Reinforced High Strength Concrete Slabs*. KTH Royal Institute of Technology, 1996.
- [9] Gouveia ND, Faria DM V., Ramos AP. – Assessment of SFRC flat slab punching behaviour – part I: monotonic vertical loading. *Mag Concr Res*, Vol. 71, 2019, p. 587–98.
- [10] McHarg PJ, Cook WD, Mitchell D, Yoon Y. – Benefits of Concentrated Slab Reinforcement and Steel Fibers on Performance of Slab-Column Connections. *ACI Struct J*, Vol. 97, 2000, p. 225–35.
- [11] Cheng M-Y, Parra-Montesinos GJ. – Evaluation of Steel Fiber Reinforcement for Punching Shear Resistance in Slab-Column Connections - Part I: Monotonically Increased Load. *ACI Struct J*, Vol. 107, 2010, p. 101–9.
- [12] Zohrevand P, Yang X, Jiao X, Mirmiran A. – Punching Shear Enhancement of Flat Slabs with Partial Use of Ultrahigh-Performance Concrete. *J Mater Civ Eng*, Vol. 27, 2014.
- [13] Nunes S, Pimentel M, Sousa C. – Mechanical and fracture behaviour of an hpfrc. BEfib2021, Valencia: RILEM-fib; 2021.
- [14] Blazy J, Nunes S, Sousa C, Pimentel M. – Development of an HPFRC for Use in Flat Slabs. RILEM Bookseries, Vol 30, 2021, p. 209–20.
- [15] CEN. EN 1992-1-1. Eurocode 2 — Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. 2004.