



NOVA

NOVA SCHOOL OF
SCIENCE & TECHNOLOGY

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

JOÃO PEDRO DE MATOS RELVAS

Licenciado em Engenharia Civil

UTILIZAÇÃO RACIONAL DE BETÕES DE ALTA RESISTÊNCIA REFORÇADOS COM FIBRAS DE AÇO EM LAJES FUNGIFORMES

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

Universidade NOVA de Lisboa

Maio, 2022

UTILIZAÇÃO RACIONAL DE BETÕES DE ALTA RESISTÊNCIA REFORÇADOS COM FIBRAS DE AÇO EM LAJES FUNGIFORMES

JOÃO PEDRO DE MATOS RELVAS

Licenciado em Engenharia Civil

Orientador: Carla Alexandra da Cruz Marchão,
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: Brisid Isufi,
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Doutora Maria Teresa T. G. Santana, Professora Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Arguentes: Doutor Rui Pedro César Marreiros, Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Vogais: Doutora Carla Alexandra da Cruz Marchão, Professora Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

Universidade NOVA de Lisboa
Maio, 2022

Copyright © João Pedro de Matos Relvas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

|

Aos meus pais e irmã

AGRADECIMENTOS

Neste espaço queria deixar uma palavra de agradecimento a todos os que de alguma forma contribuíram para o sucesso desta etapa do meu percurso académico.

Em primeiro lugar queria agradecer à minha orientadora científica, à professora Doutora Carla Marchão, pela motivação, dedicação e interesse.

Ao meu coordenador científico, o Doutor Brisid Isufi, pela amizade, disponibilidade e excelente acompanhamento desde o primeiro até ao último dia desta dissertação.

Um agradecimento especial ao Sr. José Gaspar e ao Sr. Jorge Silvério, por todo o apoio nos trabalhos de laboratório.

Agradeço aos meus colegas e amigos mais próximos pela amizade, pelos momentos partilhados ao longo destes últimos anos.

Finalmente, aos meus pais e irmã, a quem devo tudo o que sou e alcancei na vida. Agradeço-lhes pelo apoio, educação, carinho e força.

RESUMO

As lajes fungiformes são uma solução estrutural amplamente utilizada nos edifícios atuais. No entanto, o fenômeno do punçoamento é condicionante e, geralmente, rege o seu dimensionamento. A verificação da segurança ao punçoamento leva, normalmente, a um incremento dos custos e do consumo de material. Estudos anteriormente realizados demonstram que a utilização de um betão reforçado com fibras de aço (BRF) ou um betão de elevada resistência (BER) na região perto do pilar, mesmo sendo a restante laje constituída por betão normal, resulta numa melhoria significativa do comportamento, da laje, em relação ao punçoamento.

Com o intuito de aprofundar este assunto, o presente trabalho apresenta uma investigação experimental sobre o comportamento da ligação laje-pilar, em lajes fungiformes, com utilização de um betão de elevado desempenho reforçado com fibras de aço (BEDRF).

Foram elaborados e ensaiados cinco modelos de laje fungiforme, com uma espessura de 150 mm. As variáveis em estudo foram a percentagem geométrica de armadura longitudinal e a largura da zona de BEDRF, nos respetivos modelos. Uma das lajes foi produzida apenas por betão normal e serviu como referência.

Os resultados demonstram que a solução foi eficaz para as duas taxas de armadura longitudinal. A carga de fendilhação, carga máxima e a capacidade de deformação foram incrementados significativamente, até para a laje com menor largura de BEDRF. Conclui-se que a utilização de BEDRF na zona da ligação laje-pilar é eficiente e é boa uma solução em relação ao estado limite de utilização, ao aumentar a resistência à tração do betão, controlando a abertura de fissuras, e em relação ao estado limite último, ao incrementar a capacidade de carga para lajes fungiformes sobre cargas gravíticas.

Palavas chave: BEDRF, Betão de elevada resistência, Betão reforçado com fibras, Punçoamento, Laje fungiforme, BRF, BER;

ABSTRACT

Flat slabs are a structural solution widely used in buildings today. However, the punching shear phenomenon is a conditioning factor and, generally, governs its dimensioning. The verification of punching shear normally leads to an increase in costs and material consumption. Previous studies show that the use of steel fiber reinforced concrete (FRC) or high strength concrete (HSC) in the region close to the column, even though the remaining slab is made of normal concrete, results in a significant improvement in the behaviour of the slab.

In order to study this subject, the present work presents an experimental investigation on the behaviour of slab-column connections, in flat slabs, using a high-performance fiber reinforced concrete (HPFRC). Five models of flat slabs, with a thickness of 150 mm, were designed and tested. The variables under study were the geometric percentage of longitudinal reinforcement and the width of the HPFRC zone. One of the slabs was produced with normal concrete only and served as a reference.

The results demonstrate that the solution was effective for both longitudinal reinforcement ratios. Cracking load, maximum load and deformation capacity were significantly increased, even for the slab that has the smallest HPFRC geometry. It is concluded that the use of HPFRC in the area of slab-column connection is efficient in relation to the serviceability limit state, by increasing the tensile strength of concrete, controlling the opening of cracks, and ultimate limit state, by increasing the load capacity for flat slabs under gravity loads.

Keywords: HPFRC, High strength concrete, Steel fiber reinforced concrete, Punching shear, Flat slabs, FRC, HSC;

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	VIII
RESUMO	X
ABSTRACT	XII
ÍNDICE.....	XIV
ÍNDICE DE FIGURAS	XVII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	XXIII
1. INTRODUÇÃO	27
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	27
1.2. OBJETIVOS.....	28
1.3. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO.....	28
2. ESTADO DA ARTE	31
2.1. INTRODUÇÃO.....	31
2.2. PUNÇAMENTO EM LAJES DE BETÃO REFORÇADO COM FIBRAS E/OU DE ELEVADA RESISTÊNCIA	31
2.2.1. <i>Swamy e Ali - 1982</i>	31
2.2.2. <i>Narayanan e Darwish - 1987</i>	33
2.2.3. <i>Marzouk e Hussein - 1992</i>	36
2.2.4. <i>Chanthabouala et al. - 2018</i>	38
2.2.5. <i>Ozden et al. - 2006</i>	39
2.2.6. <i>Gouveia et al. - 2014</i>	41
2.2.7. <i>Inácio et al. - 2015</i>	43
2.2.8. <i>Inácio et al. - 2020</i>	44
2.2.9. <i>Maya et al. e Muttoni et al. - 2012</i>	47
2.3. NORMAS	50
2.3.1. <i>Eurocódigo 2 - NP EN 1992-1-1</i>	50
2.3.2. <i>MC2010</i>	52
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	55
3.1. INTRODUÇÃO.....	55
3.2. DESCRIÇÃO DOS MODELOS	55
3.3. SISTEMA DE ENSAIO.....	56
3.3.1. <i>Instrumentação dos Ensaios</i>	60
3.4. MATERIAIS.....	62
3.4.1. <i>Betão convencional</i>	62
3.4.2. <i>Betão de Elevado Desempenho Reforçado com Fibras de Aço</i>	63

3.4.2.1.	Introdução.....	63
3.4.2.2.	Programa Experimental para Aferição da Composição do Betão.....	63
3.4.2.3.	Composição.....	68
3.4.2.4.	Procedimento de amassadura.....	69
3.4.3.	<i>Caracterização Mecânica</i>	69
3.4.3.1.	Resistência à Compressão.....	69
3.4.3.2.	Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	72
3.4.3.3.	Módulo de Elasticidade.....	73
4.	ANÁLISE DE RESULTADOS	75
4.1.	INTRODUÇÃO.....	75
4.2.	RELAÇÃO CARGA - DESLOCAMENTO.....	75
4.3.	MODOS DE ROTURA.....	76
4.4.	DESLOCAMENTOS VERTICAIS.....	84
4.4.1.	<i>Modelo HP0_R0.6</i>	84
4.4.2.	<i>Modelo HP600_R0.6</i>	86
4.4.3.	<i>Modelo HP960_R0.6</i>	87
4.4.4.	<i>Modelo HP600_R1.0</i>	88
4.4.5.	<i>Modelo HP960_R1.0</i>	90
4.4.5.1.	Considerações Finais.....	91
4.5.	EXTENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL SUPERIOR.....	92
4.5.1.	<i>Modelo HP0_R0.6</i>	93
4.5.2.	<i>Modelo HP600_R0.6</i>	94
4.5.3.	<i>Modelo HP960_R0.6</i>	95
4.5.4.	<i>Modelo HP600_R1.0</i>	97
4.5.5.	<i>Modelo HP960_R1.0</i>	98
4.5.5.1.	Considerações Finais.....	99
4.6.	INFLUÊNCIA DO BEDRF NA CAPACIDADE DE CARGA.....	100
4.7.	ANÁLISE DO EFEITO DO BETÃO COM FIBRAS NA CAPACIDADE DE CARGA.....	101
4.7.1.	<i>Eurocódigo 2 - NP EN 1992-1-1</i>	101
4.7.2.	<i>Maya et al. e Muttoni et al. - 2012</i>	102
5.	CONCLUSÕES	109
5.1.	INTRODUÇÃO.....	109
5.2.	DESLOCAMENTOS VERTICAIS.....	109
5.3.	EXTENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL SUPERIOR.....	109
5.4.	INFLUÊNCIA DO BEDRF NA CAPACIDADE DE CARGA.....	110
6.	BIBLIOGRAFIA	111

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - ESQUEMA DOS MODELOS REALIZADOS POR SWAMY E ALI (ADAPTADO DE [1]).....	32
FIGURA 2 - ESQUEMA DA LAJE DIMENSIONADA POR NARAYANAN E DARWISH (ADAPTADO DE [2])	33
FIGURA 3 - RELAÇÃO CARGA-DESLOCAMENTO DE ALGUNS MODELOS DIMENSIONADOS POR MARZOUK E HUSSEIN (ADAPTADO DE [3])	37
FIGURA 4 - SISTEMA DE ENSAIO DE CHANTHABOUALA ET AL. (ADAPTADO DE [4]).....	38
FIGURA 5 - MODELO DE LAJE DE OZDEN ET AL. (ADAPTADO DE [5]).....	39
FIGURA 6 - TIPO DE FENDAS DESCRITAS POR OZDEN ET AL. (ADAPTADO DE [5]).....	40
FIGURA 7 - ESQUEMA DE ENSAIO ADOTADO POR GOUVEIA ET AL. [6]	42
FIGURA 8 - CURVAS CARGA-DESLOCAMENTO DOS MODELOS DE INÁCIO ET AL. (ADAPTADO DE [8])	46
FIGURA 9 - PERÍMETRO DE ROTURA DE PUNÇAMENTO ATRAVÉS DA ESCORA TEÓRICA DE COMPRESSÃO	47
FIGURA 10 - AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO PUNÇAMENTO E DA CAPACIDADE DE DEFORMAÇÃO DE ACORDO COM O CSCT	48
FIGURA 11 - PERÍMETROS DE CONTROLO TÍPICOS EM TORNO DE ÁREAS CARREGADAS (ADAPTADO DE [13]).....	51
FIGURA 12 - ASPETO DE UM MODELO DE LAJE APÓS (A) BETONAGEM E (B) ENSAIO.....	56
FIGURA 13 - MACACO HIDRÁULICO E PILAR FICTÍCIO	57
FIGURA 14 - GEOMETRIA E SISTEMA DE ENSAIO DOS MODELOS.....	57
FIGURA 15 - ARMADURA LONGITUDINAL E EXTENSÓMETROS: A) VARÕES SUPERIORES; B) VARÕES INFERIORES; C) DETALHE DE SECÇÃO DE CORTE; D) DETALHE DA ARMADURA	59
FIGURA 16 - EXTENSÓMETROS ELÉTRICOS LOCALIZADOS NA ARMADURA SUPERIOR.....	60
FIGURA 17 - CÉLULA DE CARGA CLC-200KNA	60
FIGURA 18 - POSICIONAMENTO DOS DEFLETÓMETROS	61
FIGURA 19 - DEFLETÓMETROS DA TML COLOCADOS NA FACE SUPERIOR E INFERIOR.....	62
FIGURA 20 - BETONEIRA UTILIZADA NA PRODUÇÃO DO BETÃO.....	62
FIGURA 21 - DRAMIX® 5D 65/60 BG E DRAMIX® OL 13/.20.....	64
FIGURA 22 - SISTEMA DE ENSAIO E ESQUEMA DE FORÇAS DO WST (ADAPTADO DE [10]).....	66
FIGURA 23 - DIAGRAMAS F_{sp} - CMOD, PARA (A) UM TIPO DE FIBRA E PARA (B) DOIS TIPOS DE FIBRAS (ADAPTADO DE [10]).....	67
FIGURA 24 - CMOD CORRESPONDENTE AO MÁXIMO VALOR DE F_{sp} (ADAPTADO DE [10]).....	68
FIGURA 25 - AMOSTRAS DE BETÃO RECOLHIDAS EM MOLDES CÚBICOS E CILÍNDRICOS E PROCESSO DE RECOLHA DE AMOSTRA DO BETÃO BEDRF	69
FIGURA 26 - ENSAIOS DE COMPRESSÃO A PROVETES CÚBICOS (A) E CILÍNDRICOS (B).....	70
FIGURA 27 - ROTURA DE PROVETES CÚBICOS DE BETÃO NORMAL (A) E BEDRF (B)	70
FIGURA 28 - ROTURA DE PROVETES CILÍNDRICOS DE BETÃO NORMAL (A) E BEDRF (B)	71
FIGURA 29 - ENSAIO E ROTURA À COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	72
FIGURA 30 - ENSAIO AO MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	73
FIGURA 31 - EVOLUÇÃO DOS DESLOCAMENTOS VERTICAIS COM A CARGA APLICADA, PARA CADA MODELO	75
FIGURA 32 - VISTA GERAL SUPERIOR E INFERIOR, RESPECTIVAMENTE, DO MODELO HP0_R0.6.....	78
FIGURA 33 - VISTA GERAL SUPERIOR E INFERIOR, RESPECTIVAMENTE, DO MODELO HP600_R0.6.....	79

FIGURA 34 - VISTA GERAL SUPERIOR E INFERIOR, RESPECTIVAMENTE, DO MODELO HP960_R0.6.....	80
FIGURA 35 - VISTA GERAL SUPERIOR E INFERIOR, RESPECTIVAMENTE, DO MODELO HP600_R1.0.....	81
FIGURA 36 - VISTA GERAL SUPERIOR E INFERIOR, RESPECTIVAMENTE, DO MODELO HP960_R1.0.....	82
FIGURA 37 - CORTES NOS MODELOS SEGUNDA A DIREÇÃO N-S.....	83
FIGURA 38 - CORTES EM DUAS DIREÇÕES: A) MODELO HP600_R0.6; B) MODELO HP960_R1.0.....	83
FIGURA 39 - EVOLUÇÃO DOS DESLOCAMENTOS VERTICAIS COM A CARGA VERTICAL PARA O MODELO HP0_R0.6.....	84
FIGURA 40 - DEFORMADAS NO MODELO HP0_R0.6 PARA O ALINHAMENTO N-S.....	85
FIGURA 41 - DEFORMADAS NO MODELO HP0_R0.6 PARA O ALINHAMENTO E-O.....	85
FIGURA 42 - EVOLUÇÃO DOS DESLOCAMENTOS VERTICAIS COM A CARGA VERTICAL PARA O MODELO HP600_R0.6.....	86
FIGURA 43 - DEFORMADAS NO MODELO HP600_R0.6 PARA O ALINHAMENTO S-N.....	86
FIGURA 44 - DEFORMADAS NO MODELO HP600_R0.6 PARA O ALINHAMENTO E-O.....	87
FIGURA 45 - EVOLUÇÃO DOS DESLOCAMENTOS VERTICAIS COM A CARGA VERTICAL PARA O MODELO HP960_R0.6.....	87
FIGURA 46 - DEFORMADAS NO MODELO HP960_R0.6 PARA O ALINHAMENTO S-N.....	88
FIGURA 47 - DEFORMADAS NO MODELO HP960_R0.6 PARA O ALINHAMENTO E-O.....	88
FIGURA 48 - EVOLUÇÃO DOS DESLOCAMENTOS VERTICAIS COM A CARGA VERTICAL PARA O MODELO HP600_R1.0.....	89
FIGURA 49 - DEFORMADAS NO MODELO HP600_R1.0 PARA O ALINHAMENTO S-N.....	89
FIGURA 50 - DEFORMADAS NO MODELO HP600_R1.0 PARA O ALINHAMENTO E-O.....	90
FIGURA 51 - EVOLUÇÃO DOS DESLOCAMENTOS VERTICAIS COM A CARGA VERTICAL PARA O MODELO HP960_R1.0.....	90
FIGURA 52 - DEFORMADAS NO MODELO HP960_R1.0 PARA O ALINHAMENTO S-N.....	91
FIGURA 53 - DEFORMADAS NO MODELO HP960_R1.0 PARA O ALINHAMENTO E-O.....	91
FIGURA 54 - EVOLUÇÃO DA EXTENSÃO NA ARMADURA SUPERIOR COM O AUMENTO DA CARGA VERTICAL.....	93
FIGURA 55 - EVOLUÇÃO DA EXTENSÃO NA ARMADURA SUPERIOR DO HP0_R0.6.....	93
FIGURA 56 - DISTRIBUIÇÃO TRANSVERSAL DAS EXTENSÕES DA ARMADURA LONGITUDINAL SUPERIOR DO MODELO HP0_R0.6.....	94
FIGURA 57 - EVOLUÇÃO DA EXTENSÃO NA ARMADURA SUPERIOR DO HP600_R0.6.....	95
FIGURA 58 - DISTRIBUIÇÃO TRANSVERSAL DAS EXTENSÕES DA ARMADURA LONGITUDINAL SUPERIOR DO MODELO HP600_R0.6.....	95
FIGURA 59 - EVOLUÇÃO DA EXTENSÃO NA ARMADURA SUPERIOR DO HP960_R0.6.....	96
FIGURA 60 - DISTRIBUIÇÃO TRANSVERSAL DAS EXTENSÕES DA ARMADURA LONGITUDINAL SUPERIOR DO MODELO HP960_R0.6.....	96
FIGURA 61 - EVOLUÇÃO DA EXTENSÃO NA ARMADURA SUPERIOR DO HP600_R1.0.....	97
FIGURA 62 - DISTRIBUIÇÃO TRANSVERSAL DAS EXTENSÕES DA ARMADURA LONGITUDINAL SUPERIOR DO MODELO H600_R1.0.....	97
FIGURA 63 - EVOLUÇÃO DA EXTENSÃO NA ARMADURA SUPERIOR DO HP960_R1.0.....	98
FIGURA 64 - DISTRIBUIÇÃO TRANSVERSAL DAS EXTENSÕES DA ARMADURA LONGITUDINAL SUPERIOR DO MODELO H960_R1.0.....	98
FIGURA 65 - CARGAS DE ROTURA DOS MODELOS DE LAJE.....	100
FIGURA 66 - CURVA $V - \psi$ PARA O MODELO HP0_R0.6.....	105
FIGURA 67 - CURVA $V - \psi$ PARA O MODELO HP600_R0.6.....	105
FIGURA 68 - CURVA $V - \psi$ PARA O MODELO HP960_R0.6.....	105
FIGURA 69 - CURVA $V - \psi$ PARA O MODELO HP600_R1.0.....	106
FIGURA 70 - CURVA $V - \psi$ PARA O MODELO HP960_R1.0.....	106

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - PARÂMETROS DAS LAJES REALIZADAS POR NARAYANAN E DARWISH [2]	34
TABELA 2 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS BETÕES COM FIBRAS DE AÇO UTILIZADOS NOS MODELOS DE GOUVEIA ET AL. [6].....	42
TABELA 3 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS BETÕES COM FIBRAS DE AÇO UTILIZADOS NOS MODELOS DE INÁCIO ET AL. [7].....	43
TABELA 4 - CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS DE LAJE DE INÁCIO ET AL. [8].....	44
TABELA 5 - CARACTERIZAÇÃO DO BER ADOTADO POR INÁCIO ET AL. [7]	45
TABELA 6 - CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS.....	59
TABELA 7 - COMPOSIÇÃO DA MISTURA DE BETÃO POR S. NUNES ET AL. [10].....	64
TABELA 8 - PERCENTAGEM DE CADA TIPO DE FIBRAS NAS MISTURAS REALIZADAS POR S. NUNES ET AL. [10]	65
TABELA 9 - RESULTADOS DA TRABALHABILIDADE DAS MISTURAS PRODUZIDAS POR S. NUNES ET AL. [10].....	66
TABELA 10 - COMPOSIÇÃO DA MISTURA DE BEDRF.....	68
TABELA 11 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM CUBOS	71
TABELA 12 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM CILINDROS.....	72
TABELA 13 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	72
TABELA 14 - MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	73
TABELA 15 - EXTENSÕES MÉDIAS REGISTRADAS NA ARMADURA LONGIDUTINAL SUPERIOR ($\times 10^{-6}$).....	99
TABELA 16 - RELAÇÃO ENTRE OS VALORES DE ROTURA EXPERIMENTAIS DE CADA MODELO COM O MODELO DE REFERÊNCIA.....	100
TABELA 17 - CAPACIDADE DE CARGA DOS MODELOS ENSAIADOS PARA UM PERÍMETRO LOCALIZADO NA ZONA DE BETÃO CONVENCIONAL	101
TABELA 18 - CAPACIDADE DE CARGA DOS MODELOS ENSAIADOS PARA UM PERÍMETRO LOCALIZADO NA ZONA DE BEDRF	101
TABELA 19 - VALOR DA RESISTÊNCIA AO PUNÇOAMENTO (V_{RM}) LIMITANTE PARA CADA MODELO.....	102
TABELA 20 - CAPACIDADE RESISTENTE À FLEXÃO DOS MODELOS DE LAJE.....	104
TABELA 21 - CAPACIDADE RESISTENTE À FLEXÃO DOS MODELOS DE LAJE DE ACORDO COM [9], [16] E [19]	104
TABELA 22 - COMPARAÇÃO DAS CARGAS DE ROTURA EXPERIMENTAIS COM AS PREVISTAS	107

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Abreviaturas e Siglas

EC2 Eurocódigo 2

DEC Departamento de Engenharia Civil

BRFA Betão Reforçado com Fibras de Aço

BER Betão de Elevada Resistência

BRF Betão Reforçado com Fibras

BEDRF Betão de Elevado Desempenho Reforçado com Fibras

Símbolos

Minúsculas romanas

b_{pf} perímetro crítico do punçoamento nas lajes de betão reforçado com fibras

b_{q1} e b_{q2} distâncias na direção x desde a face do pilar até aos apoios

c_{BEDRF} largura da região com BEDRF

c largura do pilar

d altura útil média da laje

$f_{c,cubo}$ tensão de rotura do betão à compressão em cubos

$f_{c,cubo150}$ resistência à compressão do betão em cubos com 150 mm de lado

$f_{c,cubo100}$ resistência à compressão do betão em cubos com 100 mm de lado

f_c tensão de rotura do betão à compressão em cilindros

f_{cm} valor médio da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias em provetes cilíndricos (150x300 mm²)

$f_{ct,sp}$ tensão de rotura à tração do betão por compressão diametral em cilindros

$f_{ct2,f}$ tensão de tração residual do BEDRF para uma abertura de fenda de 3.0 mm

k_b fator adimensional que tem em conta a geometria da fibra

$m_{R,BEDRF}$ valor do momento fletor resistente por unidade de comprimento do BEDRF

$m_{R,BN}$ valor do momento fletor resistente por unidade de comprimento do betão normal sem fibras

m_R valor médio do momento fletor resistente por unidade de comprimento

v_b tensão de arrancamento nas fibras ao longo da fenda inclinada

u perímetro de controlo de punçoamento

w abertura de fenda

Maiúsculas romanas

F parâmetro que tem em consideração três fatores: esbelteza da fibra, a percentagem volumétrica de fibras adicionadas e um fator de ligação, d_f

E valor médio do módulo de elasticidade

F_f parâmetro adimensional que tem em consideração três fatores: esbelteza das fibras, a percentagem volumétrica de fibras adicionadas e um fator de ligação

D_f diâmetro das fibras

L_f comprimento das fibras

V força de punçoamento

V_{exp} carga de rotura experimental ao punçoamento

V_{flex} força resistente à flexão da laje

V_{Rm} valor médio da força resistente ao punçoamento

$V_{Rm.ref}$ valor médio da força resistente ao punçoamento do modelo de referência

B largura total do modelo de laje

Gregas

λ_s fator que traduz o efeito de escala que depende da espessura

β_1 fator relativo à profundidade da zona comprimida

ρ_f percentagem volumétrica de fibras

ρ percentagem geométrica de armadura longitudinal

τ tensão média de ligação das fibras ao betão na interface

ρ_{lx} e ρ_{ly} taxas geométricas de armadura de tração aderentes na direção x e y

σ_{cx} e σ_{cy} tensões de compressão no betão nas direções x e y

α_{cc} fator que tem em conta os efeitos de longo prazo sobre a resistência à compressão e também os efeitos desfavoráveis devido às condições de carga

$\psi_{u,calc}$ rotação da laje

1.1. Considerações Gerais

As lajes fungiformes são atualmente uma solução comum, interessante e económica para a realização de edifícios. As principais vantagens desta solução prendem-se com a flexibilidade de organização de espaços e com a rapidez de execução associada à tecnologia utilizada na construção. Um dos inconvenientes é o fenómeno do punçoamento, que surge pela atuação da carga concentrada inerente ao pilar, na laje. A rotura por punçoamento ocorre numa laje quando se produz um corte repentino, sem aviso prévio, à volta do pilar, no qual a laje se apoia. Em alguns casos, e apesar da rotura por punçoamento ser um fenómeno localizado, pode dar início a uma rotura progressiva e ao colapso total da estrutura, com eventuais danos pessoais e materiais elevados.

Para mitigar este fenómeno, foram desenvolvidas técnicas para melhorar a capacidade resistente ao punçoamento, tais como, a colocação de capitéis de betão, o aumento da espessura da laje ou da secção do pilar e a colocação de armaduras transversais na forma de estribos. Cada uma destas técnicas apresenta vantagens e desvantagens consoante o caso a que for aplicado.

Recentemente, a utilização de betão com fibras revelou-se promissora, já que as fibras têm a capacidade de absorver a tensão pós-fendilhação do betão em qualquer direção, tornando-o mais dúctil e no facto de aumentarem a resistência à tração do betão, o que atrasa o início da fendilhação e aumenta a resistência ao punçoamento. Esta solução associada a um betão de elevada resistência ainda não está suficientemente testada no que se refere ao punçoamento de lajes fungiformes.

Pretende-se assim estudar o comportamento da zona de ligação pilar-laje fungiforme em BEDRF, quando sujeita a ações gravíticas.

1.2. Objetivos

Este trabalho tem por objetivo estudar o comportamento da ligação laje-pilar, em lajes fungiformes, com utilização de um betão de elevado desempenho reforçado com fibras de aço (BEDRF). Apesar dos vários ensaios experimentais existentes ao punçoamento em lajes fungiformes, reportados na literatura, a maioria foi realizada em modelos de laje com betões com resistência à compressão inferior a 90 MPa.

A motivação deste trabalho prende-se com o aumento da capacidade resistente utilizando uma solução que seja económica e de fácil aplicação. O custo associado à produção do BEDRF é mais elevado do que do betão convencional, pelo que se torna necessária a escolha de uma zona localizada para aplicação deste material. Considera-se também uma prioridade melhorar o comportamento aos estados limites de utilização, nomeadamente, no que diz respeito à deformação e fendilhação das lajes. Os parâmetros a estudar são a variação da percentagem longitudinal de armadura e a largura da zona de BEDRF.

Em conformidade com os objetivos apresentados, estabeleceram-se as seguintes etapas:

- Compilação da informação existente em trabalhos anteriores, no que se refere ao comportamento do betão de elevada resistência e ao betão reforçado com fibras, em simultâneo ou não;
- Elaboração de cinco modelos de laje de betão: uma laje de referência (sem adição de fibras ou de BEDRF), e quatro lajes em que se fez variar a percentagem de armadura longitudinal (0.6% ou 1.0%) e a largura da zona de BEDRF (600 mm ou 960 mm);
- Ensaio dos modelos de laje produzidos, para determinar a sua capacidade de carga e analisar os parâmetros de deformação e fendilhação;

1.3. Organização do documento

Este trabalho é constituído por cinco capítulos, incluindo o presente capítulo introdutório.

No capítulo 2 é descrito o estado de conhecimento sobre o punçoamento em lajes fabricadas com betão de elevado desempenho, com adição de fibras. São apresentados o resumo de alguns trabalhos realizados, existentes na literatura, com o objetivo de estudar o comportamento de lajes fungiformes de betão de elevado desempenho reforçado com fibras quando sujeito ao fenómeno do punçoamento. Para tal, são apresentados os modelos ensaiados e respetivas conclusões obtidas. No final deste capítulo são ainda apresentadas as formulações de cálculo da resistência ao punçoamento preconizadas no EC2 [14] e segundo o MC2010 [12].

No capítulo 3 apresenta-se o programa experimental relativo à produção e ensaio das lajes. Descrevem-se os modelos, o sistema de ensaio, e respetiva instrumentação, as propriedades dos materiais e a sua caracterização.

No capítulo 4 são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios experimentais, nomeadamente, a relação Carga-Deslocamento, os modos de rotura, os deslocamentos verticais, as extensões na armadura longitudinal superior e a influência do BEDRF na capacidade de carga. São ainda apresentados os resultados da resistência ao punçoamento segundo o EC2 [14], onde se comparam esses valores com os valores experimentais obtidos. Por último são apresentados os resultados (gráficos e numéricos) das formulações desenvolvidas por Maya et al. [9] e Muttoni et al. [10] [11].

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas neste trabalho de investigação.

2.1. Introdução

Nos dias de hoje, a utilização de lajes fungiformes apresenta-se como uma solução estrutural corrente, onde as lajes apoiam diretamente nos pilares, sem a necessidade de vigas, perspetivando grandes vantagens como proporcionar um menor espaço ocupado pela estrutura da laje e pelo facto de facilitar a execução.

O dimensionamento das lajes fungiformes é condicionado, usualmente, pelo fenómeno do punçoamento. O aumento da resistência ao punçoamento pode ser conseguido através do aumento da espessura da laje (em toda a laje ou só na região de ligação laje-pilar) e o reforço ao punçoamento através do aumento da resistência à compressão do betão. Embora não seja uma solução, o aumento da percentagem geométrica de armadura longitudinal traduz-se num acréscimo da resistência ao punçoamento.

No presente capítulo é apresentado um resumo de alguns dos trabalhos de investigação, presentes na literatura, com o intuito de estudar o comportamento ao punçoamento de lajes fungiformes, essencialmente com BRF e BER.

2.2. Punçoamento em lajes de betão reforçado com fibras e/ou de elevada resistência

Nesta seção é apresentada a informação de trabalhos experimentais anteriores que estudam o comportamento ao punçoamento de lajes fungiformes compostas por BER e/ou BRF. Assim, é disposto seguindo uma ordem cronológica os seguintes estudos experimentais: Swamy e Ali [1]; Narayanan e Darwish [2]; Marzouk e Hussein [3]; Chanthabouala et al. [4]; Ozden et al. [5]; Gouveia et al. [6]; Inácio et al. (2015) [7]; Inácio et al. (2020) [8]; Maya e Muttoni [9] [10].

2.2.1. Swamy e Ali - 1982

Swamy e Ali [1] realizaram ensaios em modelos de laje fungiforme, simplesmente apoiados nos quatro bordos, utilizando betão reforçado com fibras, com o objetivo de estudar o comportamento da ligação laje-pilar ao punçoamento. A utilização de fibras surgiu a partir da impossibilidade da colocação de armadura tradicional. O sistema de ensaio foi idealizado de forma a abranger a área de momentos negativos da laje, na região do pilar, limitada pela linha de momentos nulos. Os modelos, representados na Figura 1, tinham uma dimensão de $1800 \times 1800 \times 125 \text{ mm}^3$ com uma altura útil (d) de 100 mm. O pilar, de dimensões $150 \times 150 \text{ mm}^2$

e com uma altura de 250 mm, foi realizado em betão armado e colocado na face superior da laje (zona central), para simular a carga. As lajes foram dimensionadas considerando uma resistência à compressão do betão, em provetes cúbicos, de 45 MPa, aos 28 dias. Os principais parâmetros em estudo foram: quantidade, localização e tipo de fibras de aço (onduladas e lisas); quantidade e localização da armadura longitudinal de flexão; combinação das fibras de aço com a armadura específica de punçoamento.

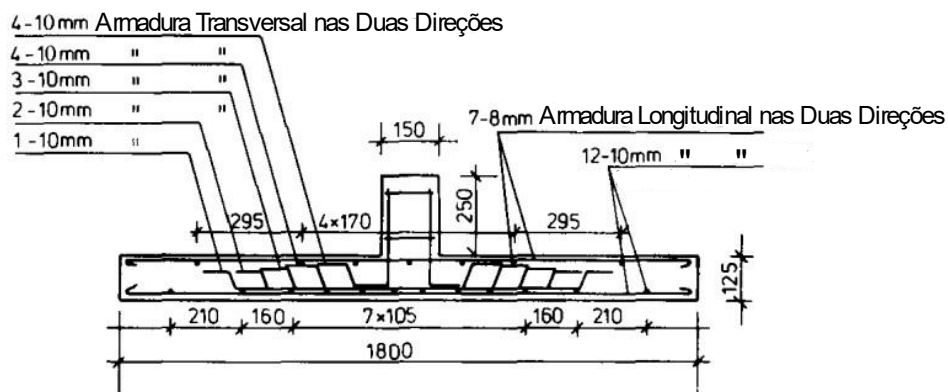


Figura 1 - Esquema dos modelos realizados por Swamy e Ali (adaptado de [1])

As principais conclusões de Swamy e Ali [1] foram:

- As fibras onduladas são eficientes em mitigar deformações e aumentam a capacidade de carga ao punçoamento, a ductilidade e a absorção de energia transmitida à laje. As fibras retas não apresentam um comportamento tão eficaz;
- As fibras provocam um aumento substancial da carga de rotura, ao incrementar a ductilidade em 100% e absorção de energia em 300%, para um volume de fibras de 1%;
- As fibras não só alteram a forma de rotura ao punçoamento (de forma quadrada para circular), assim como afastam a região de rotura da zona da ligação laje-pilar, o que se traduz no aumento da resistência ao punçoamento;
- O reforço com fibras aumentou a capacidade de flexão da ligação laje-pilar em 30% a 40%;
- A adição de fibras tem um papel fundamental no controlo da fendilhação, até depois de ultrapassada a carga última, ao aumentar a resistência residual da ligação, em cerca de 70% a 75%, para um volume de fibras de 1%;

2.2.2. Narayanan e Darwish - 1987

Narayanan e Darwish [2] estudaram o comportamento de lajes de betão reforçado com fibras de aço, sujeitas ao punçoamento. Para tal, ensaiaram 12 lajes quadradas, representadas na Figura 2, com 780 mm de lado e com 60 mm de espessura, simplesmente apoiadas nos quatro bordos, idealizadas para uma rotura ao punçoamento. O carregamento foi simulado por um pilar quadrado em betão com 100 mm de lado. As dimensões representam, com aproximação, a região de momentos negativos.

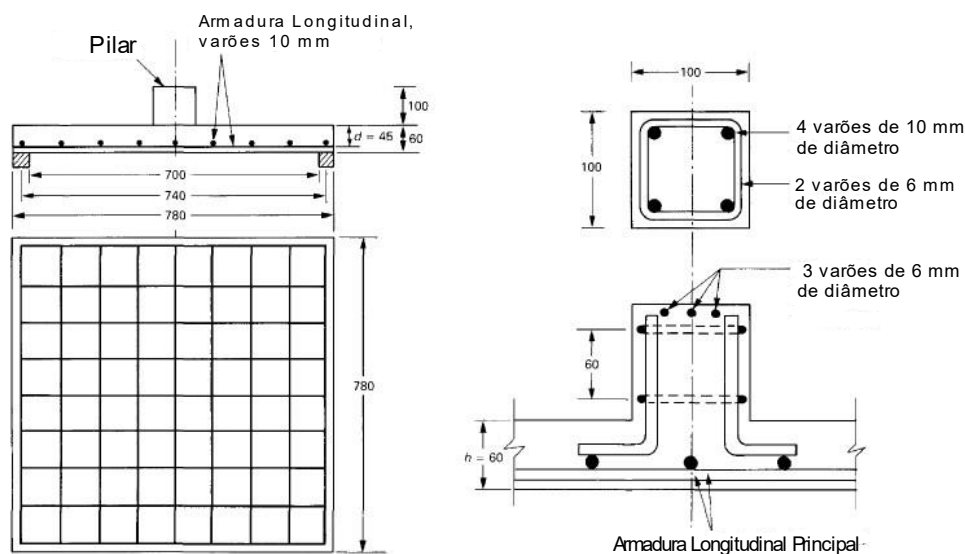


Figura 2 - Esquema da laje dimensionada por Narayanan e Darwish (adaptado de [2])

Os autores realizaram três séries de ensaios. A primeira série teve como objetivo o estudo da variação da percentagem de fibras. Para isso ensaiaram 6 lajes, com percentagens de fibras a variar entre 0.00% e 1.25%, com um intervalo de 0.25% entre elas. Na segunda série estudou-se a variação da percentagem de armadura longitudinal. Para isso ensaiaram 4 lajes, com uma quantidade de 8, 10, 11 e 12 varões de aço com 10 mm de diâmetro, em cada direção. Na terceira série estudou-se a resistência à compressão do betão. Para tal ensaiaram 2 lajes, com um betão caracterizado por uma resistência de 40 N/mm^2 . Os resultados destas 2 lajes foram comparados com os resultados da laje S5, por terem as mesmas características exceto na resistência do betão. A Tabela 1 apresenta os parâmetros das lajes realizadas pelos autores.

Tabela 1 - Parâmetros das lajes realizadas por Narayanan e Darwish [2]

Série	Modelo	Nº	D [mm]	Esp. [mm]	F	$f_{c,cubo}$ [Mpa]	$f_{ct,sp}$ [Mpa]	b_{pf} [mm]
1	S1	9	10	95	-	54.1	3.41	966
	S2	9	10	95	0.19	65.1	4.17	865
	S3	9	10	95	0.37	55.9	3.92	769
	S4	9	10	95	0.56	57.5	4.22	668
	S5	9	10	95	0.75	66.2	4.89	567
	S6	9	10	95	0.94	66.3	5.12	467
2	S7	8	10	109	0.75	58.7	4.5	567
	S8	10	10	84	0.75	56.6	4.39	567
	S9	11	10	76	0.75	54.4	4.28	567
	S10	12	10	69	0.75	59.5	4.54	567
3	S11	9	10	95	0.75	37.2	3.38	567
	S12	9	10	95	0.75	40.5	3.55	567

Nº - Número de varões em cada direção;

D - Diâmetro dos varões que compõe a armadura;

Esp. - Espaçamento entre varões;

F - Parâmetro que tem em consideração três fatores: esbelteza da fibra, a percentagem volumétrica de fibras adicionadas e um fator de ligação, d_f ;

$f_{c,cubo}$ - Tensão de rotura da mistura de betão à compressão em cubos;

$f_{ct,sp}$ - Tensão de rotura da mistura de betão à tração por compressão diametral em cilindros;

b_{pf} - Perímetro crítico de punçoamento nas lajes de betão reforçado com fibras;

Utilizaram-se fibras onduladas com um diâmetro de 0.3 mm, esbelteza de 100 e resistência última de 2000 MPa.

O carregamento foi aplicado através de um macaco hidráulico de 200 kN de capacidade. Os incrementos de carga foram de 5 kN, em intervalos de 4 minutos.

As primeiras fendas observadas na face da laje deram-se para um carregamento entre os 15 kN e os 45 kN.

Os resultados obtidos pelos autores mostram que a resistência ao punçoamento aumenta com o aumento da percentagem de fibras adicionadas. Como esperado, todas as lajes verificaram uma rotura por punçoamento, exceto a S7, que foi dimensionada para ter uma resistência ao punçoamento próxima da resistência de flexão da laje. Durante os ensaios, os autores observaram que ocorreu um maior aparecimento de fendas nas lajes com maior percentagem de fibras, apesar da abertura destas ser de menor dimensão, em comparação com as fendas da laje sem fibras.

Narayanan e Darwish [2] desenvolveram uma expressão simplificada, equação (2.1), para estimar a resistência última ao punçamento de lajes de BRFA (kN):

$$V = \lambda_s (0.24f_{spf} + 16\rho_l + v_b) b_{pf} d \quad (2.1)$$

A resistência do betão à tração por compressão diametral f_{spf} pode ser calculada através da equação (2.2).

$$f_{spf} = \frac{f_c}{20 - \sqrt{F_f}} + 0.7 + \sqrt{F_f} \quad (2.2)$$

O parâmetro adimensional F_f , que depende da esbelteza das fibras, da percentagem volumétrica de fibras adicionadas e de um factor de ligação k_b que tem em conta a geometria das fibras, pode ser calculado através da equação (2.3).

$$F_f = k_b L_f \rho_f / D_f \quad (2.3)$$

O perímetro crítico de punçamento nas lajes de betão reforçado com fibras b_{pf} pode ser calculado através da equação (2.4).

$$b_{pf} = u(1 - 0.55F_f) \quad (2.4)$$

O fator λ_s traduz o efeito de escala, que depende da espessura da laje h (mm) e pode ser calculado através da equação (2.5).

$$\lambda_s = 1.6 - 0.002h \quad (2.5)$$

A tensão de arrancamento nas fibras ao longo da fenda inclinada v_b pode ser calculada através da equação (2.6).

$$v_b = 0.41\tau F_f \quad (2.6)$$

em que:

- τ é a tensão média de ligação das fibras ao betão na interface, tomada como 4.15 MPa;
- u é o perímetro crítico localizado a $1.5d$ da face do pilar (mm);

As principais conclusões de Narayanan e Darwish [2] foram:

- A adição de fibras em lajes (com pelo menos 0.5% de percentagem de fibras adicionadas), resulta numa rotura por punçoamento mais dúctil, quando comparada com uma laje sem fibras. Após se atingir a carga máxima, observou-se um aumento considerável na carga residual, especialmente para elevadas percentagens volumétricas de fibras;
- O aumento do factor F_f mostrou ser eficiente ao aumentar a resistência ao punçoamento. O incremento deste parâmetro de 0 para 0.94, traduz um aumento da força última em 42%;
- O factor F_f influenciou a posição do perímetro crítico de punçoamento próximo da área do carregamento. Ao incrementar o valor do fator F_f , o perímetro crítico de punçoamento aproximou-se da zona de carregamento;
- A expressão desenvolvida pelos autores prevê razoavelmente a resistência ao punçoamento de lajes de betão reforçadas com fibras de aço;

2.2.3. Marzouk e Hussein - 1992

Marzouk e Hussein [3] investigaram o comportamento estrutural de lajes com a utilização de um betão de elevada resistência (BER). De notar que foi um dos primeiros estudos sobre este tipo de betão. Ensaíram 17 modelos, fazendo variar a percentagem de armadura longitudinal, a resistência à compressão do betão, a espessura da laje e a dimensão do pilar. Os modelos tinham dimensões de 1700x1700 mm², com uma espessura variável entre 90 mm e 150 mm. Utilizou-se um betão com uma resistência à compressão de 70 MPa, aos 28 dias, o que, atualmente, é considerado uma resistência não muito elevada para um BER. Foram realizados dois modelos com betão normal, como modelos de referência. O carregamento foi aplicado através de um sistema hidráulico de 670 kN de capacidade.

Os autores consideraram 3 modos de rotura: rotura por flexão pura, rotura por punçoamento pura e rotura ao punçoamento condicionada por flexão. A rotura por flexão pura caracteriza-se pela cedência das armaduras longitudinais anteriormente ao fenómeno do punçoamento. Consequentemente, a laje apresenta grandes deslocamentos para cargas mais baixas. A rotura por punçoamento pura ocorre quando a laje apresenta baixos deslocamentos, com possível cedência da armadura de tração na zona junto ao pilar. O terceiro tipo de rotura, é uma transição entre os outros dois casos.

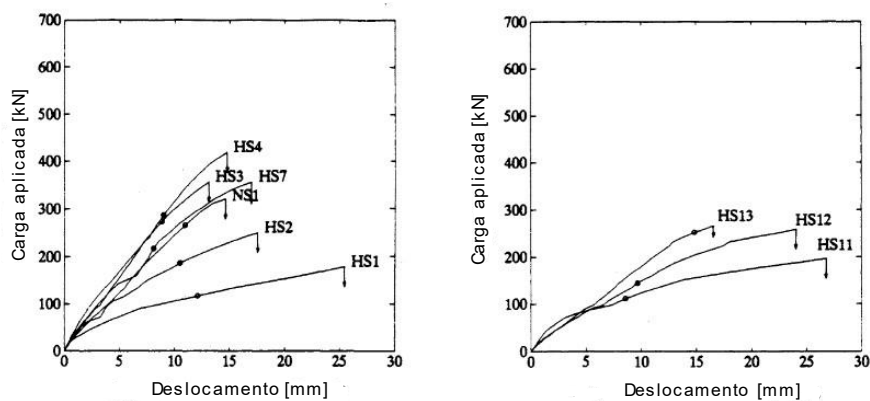


Figura 3 - Relação carga-deslocamento de alguns modelos dimensionados por Marzouk e Hussein (adaptado de [3])

As curvas carga-deslocamento das lajes HS1 e HS11, representadas na Figura 3, indicam uma rotura por punçoamento condicionada por flexão. Apesar disso, nenhuma destas lajes apresenta um estado em que os deslocamentos aumentam para uma carga constante, o que é uma característica normal para modelos que apresentem rotura por flexão. As lajes HS4 e HS3 são exemplos de rotura por punçoamento.

Para as lajes com rotura por flexão, o aparecimento de fendas começa por uma fenda tangencial, aproximadamente na região que contorna o pilar, seguido por uma fendilhação radial a partir do pilar. Ainda assim, a rotura por punçoamento ocorreu antes das fendas de flexão estarem bem desenvolvidas. Este tipo de rotura é denominado, pelos autores, como rotura flexão-punçoamento. Para as lajes com rotura ao punçoamento, as fendas formam-se primeiramente tangencialmente ao pilar, seguido da abertura de fendas radiais a partir do pilar.

As principais conclusões de Marzouk e Hussein [3] foram:

- Os dois principais modos de rotura ao punçoamento de lajes de BER podem ser classificados como flexão-punçoamento e punçoamento. Lajes compostas por BER apresentam uma rotura ao punçoamento para valores mais baixos da percentagem de armadura longitudinal (0.64%). Em geral, lajes compostas por BER exibem uma rotura mais frágil que as lajes compostas por betão normal;

- As deformações de lajes com BER cuja rotura se deu por punçoamento condicionado por flexão, são maiores do que as verificadas em lajes cuja rotura foi por punçoamento;

- Com o incremento da armadura longitudinal, a rigidez da laje aumenta e a ductilidade da laje diminui;

2.2.4. Chanthabouala et al. - 2018

Chanthabouala et al. [4] ensaiaram 10 lajes de BEDRF, reforçadas com um novo tipo de fibra de aço, com extremidade em gancho duplo. Os autores fizeram variar o volume de fibras entre 0% a 1.2%, com um incremento de 0.3%, e a percentagem volumétrica de armadura longitudinal, entre 0.9% e 1.4%. O betão tinha valores de resistência à compressão entre 80 e 100 MPa.

As lajes tinham dimensões 2200x2200x150 mm³, e o pilar 200x200x200 mm³. O sistema de ensaio está representado na Figura 4.

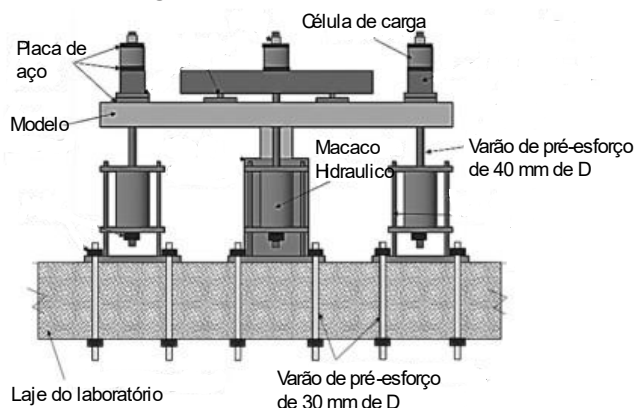


Figura 4 - Sistema de ensaio de Chanthabouala et al. (adaptado de [4])

As primeiras fendas a surgir foram fendas radiais originadas a partir dos cantos do pilar progredindo até aos bordos da laje, acompanhadas por fendas de flexão à volta da região do pilar. Quando a carga foi incrementada, estas fendas radiais foram progredindo até aos bordos da laje, enquanto outras fendas de flexão se formaram a partir da região do pilar. Observaram que ocorreu uma maior abertura de fendas para um menor espaçamento de fenda em lajes com a adição de fibras. A largura das fendas foi mais estreita em lajes com a adição de fibras. Quando a carga aplicada atingiu valores próximos da carga de colapso, a fenda circunferencial (fenómeno que resulta do punçoamento) começou a revelar-se, ao indicar que a fenda que atravessou a laje ao longo da sua espessura alcançou o topo da laje.

As principais conclusões de Chanthabouala et al. [4] foram:

- A resistência ao punçoamento pode ser significativamente melhorada com a adição de fibras de aço. Os ensaios demonstram que as lajes com fibras com extremidade em gancho duplo têm, em média, uma maior resistência ao punçoamento, entre 110% a 156%, do que lajes sem a adição de fibras, ao manter a mesma percentagem de armadura longitudinal. O incremento da resistência ao punçoamento conferido pelas fibras em extremidade em gancho duplo é, consideravelmente, maior que o conferido pelas fibras de extremidade em gancho, com uma média de 35% a 65%, dependendo do volume das fibras;

- A utilização de fibras de aço com extremidade em gacho duplo incrementa a carga de colapso. O incremento na resistência ao punçoamento das lajes é diretamente proporcional à quantidade de fibras de aço adicionadas e à percentagem volumétrica de armadura longitudinal;

- A adição de fibras pode atrasar o aparecimento das primeiras fendas de flexão porque a resistência à tração do betão é incrementada. A largura das fendas em todas as fases da carga é reduzida;

- À medida que o volume das fibras aumenta, a ductilidade da laje também aumenta, bem como a resistência ao punçoamento;

2.2.5. Ozden et al. - 2006

Ozden et al. [5] investigaram o fenómeno do punçoamento em lajes de betão normal e em lajes de BER, tendo estudado o efeito da variação da percentagem de armadura longitudinal e a utilização de fibras de aço. O programa experimental consistiu num total de 26 ensaios monotónicos de lajes, através de incrementos de carga. As lajes eram circulares, com diâmetro de 1500 mm, espessura de 120 mm, com um pilar quadrado central de 200 mm de lado, tal como representado na Figura 5.

Foram utilizados dois tipos de betão, betão normal e BER, com resistências aproximadas de 20 e 80 MPa, respetivamente. Para cada grupo de modelos foram utilizadas duas percentagens de armadura longitudinal (1.1% e 1.6%).

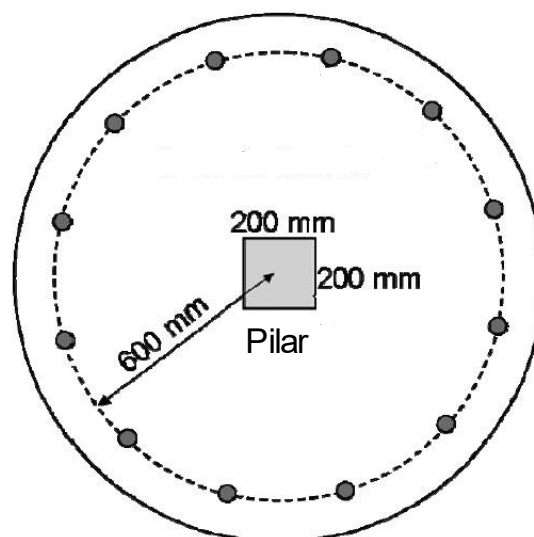


Figura 5 - Modelo de laje de Ozden et al. (adaptado de [5])

Os autores descreveram o comportamento dos modelos tendo como base a observação dos diferentes tipos de fendas que apareceram na face superior dos modelos. Para o efeito, denominam 4 tipos de fendas como F, P, Q e R, tal como ilustrado na Figura 6.

Quando a resistência à tração do betão é ultrapassada, surgem fendas paralelas à face do pilar, na região de ligação laje-pilar. Estas fendas foram denominadas de fendas F.

A formação das fendas radiais, fendas R, foram observadas após o aparecimento das fendas do tipo F e iniciam-se junto aos cantos dos pilares.

Para cargas maiores, novas fendas paralelas às faces do pilar são formadas, denominadas por fendas P. Estas fendas encontram-se a uma distância aproximada de 100 mm da face do pilar. Estes tipos de fendas são preponderantes pois é com a abertura destas que se dá a rotura por punçoamento.

A fendas do tipo Q observaram-se nos modelos em que a carga aplicada foi excêntrica. Eventualmente entes dois últimos tipos de fendas acabaram por se cruzar, originando o colapso por punçoamento.

A presença de fibras controlou a abertura de fendas fora da zona de rotura, que resultou numa maior zona não danificada, traduzindo-se num acréscimo de tensões na zona de rotura, ao afectar a carga de colapso. Algumas fendas do tipo R atravessaram a totalidade da laje ao chegar ao bordo apenas nos modelos sem a adição de fibras. Nos modelos com adição de fibras, as fendas de tipo R ficaram confinadas a uma zona circular.

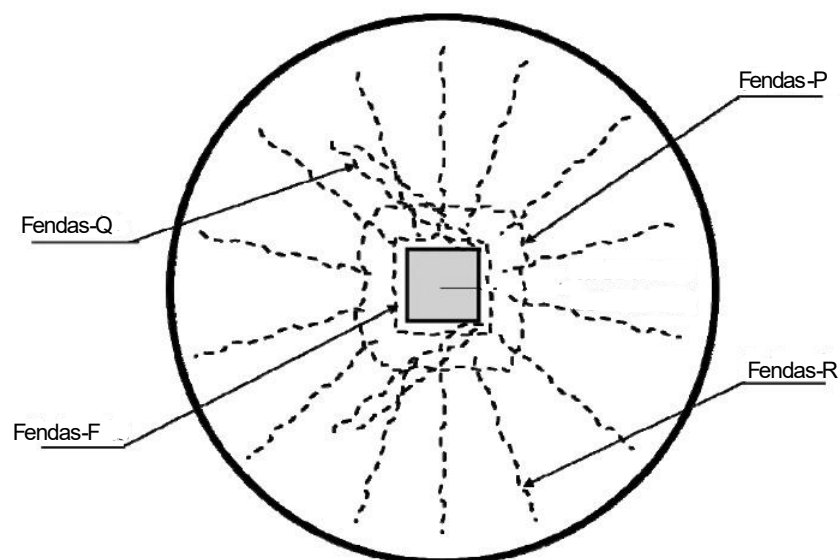


Figura 6 - Tipo de fendas descritas por Ozden et al. (adaptado de [5])

As principais conclusões de Ozden et al. [5] foram:

- A localização do perímetro crítico de punçoamento não depende dos parâmetros investigados no programa experimental, isto é, resistência à compressão do betão, percentagem de armadura longitudinal e presença de fibras. O perímetro crítico de rotura situa-se a 100 mm da face do pilar, a uma distância igual à altura útil da laje.

- A resistência do betão à compressão tem uma influência direta na resistência ao punçoamento. A rigidez inicial e rigidez pós-fendilhação é maior nos modelos BER do que nos modelos de betão normal.

- A adição de fibras a uma laje de betão incrementa significativamente a resistência ao punçoamento e reduz a fragilidade do modelo. As fendas observadas estavam mais próximas e concentradas quando se adicionaram fibras. O efeito da adição de fibras é positivo porque melhora o comportamento à tração do betão.

2.2.6. Gouveia et al. - 2014

Gouveia et al. [6] estudaram o comportamento de lajes fungiformes compostas por BRF sujeitas ao punçoamento. Os autores investigaram o efeito da variação da percentagem volumétrica das fibras e o efeito da adição de plastificante na matriz de betão, tendo sido para o efeito produzidas 6 misturas de betão (M0 a M5). Foi também ensaiada uma laje de referência, sem a adição de fibras.

Os modelos de laje eram quadrados com dimensões em planta de 1650x1650 mm² e uma espessura de cerca de 125 mm. Os modelos foram denominados de ND0 a ND5, constituídos pelas misturas de betão M0 a M5, respetivamente. A armadura longitudinal superior consistia numa malha quadrada em todos os modelos, constituída por varões de 10 mm de diâmetro, espaçados de 75 mm. A armadura longitudinal inferior era composta por varões de 6 mm de diâmetro, espaçados de 200 mm.

As outras 5 lajes continham a seguinte dosagem de fibras de aço: 0.5% vol. (ND1), 0.75% vol. (ND2 e ND3), 1.0% vol. (ND4) e 1.25% vol. (ND5). Ao betão das lajes M3, M4 e M5 foi adicionado plastificante na dosagem de 3.0 kg/m³.

A caracterização do BRF foi realizada com recurso a ensaios de compressão a cubos (150 mm de lado) e a cilindros (300 mm de altura e 150 mm de diâmetro). Posteriormente foram realizados testes à tração por compressão diametral. Na Tabela 2 são apresentadas as propriedades mecânicas dos betões com fibras de aço utilizados nos modelos de Gouveia et al. [6]. Os ensaios expressos na Tabela 2 ocorreram no mesmo dia que o ensaio da laje que corresponde a cada provete cúbico.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas dos betões com fibras de aço utilizados nos modelos de Gouveia et al. [6]

Modelo	M0 (-)	M1 (0.50%)	M2 (0.75%)	M3 (0.75%)	M4 (1.00%)	M5 (1.25%)
$f_{c,cubo150}$ [MPa] ⁽¹⁾	44.8	42.2	39.8	57.7	57.2	55.6
f_c [MPa] ⁽²⁾	35.9	33.8	31.8	46.2	45.8	44.5
$f_{ct,sp}$ [MPa] ⁽³⁾	3.41	3.43	3.48	4.25	5.09	5.44

⁽¹⁾ valor médio da tensão de rotura do betão à compressão em cubos (150x150x150 mm³);

⁽²⁾ valor médio da tensão de rotura do betão à compressão em cilindros;

⁽³⁾ valor médio da tensão de rotura do betão à tração por compressão diametral em cilindros;

Os resultados demonstram que há uma tendência para a resistência à compressão diminuir significativamente com o aumento da percentagem volumétrica de fibras. A adição de plastificante (misturas M3 a M5) traduziu num aumento da resistência à compressão, em relação às misturas sem plastificante (M0 a M2). Os resultados do ensaio à tração por compressão diametral demonstram que à medida que a percentagem volumétrica de fibras aumenta, a tensão de rotura do betão à tração também aumenta.

A carga vertical aplicada aos modelos foi medida utilizando quatro células de carga. Para a determinação dos deslocamentos verticais dos modelos foram utilizados onze defletómetros elétricos.

Na Figura 7 é apresentado o aspeto geral do ensaio realizado por Gouveia et al. [6].

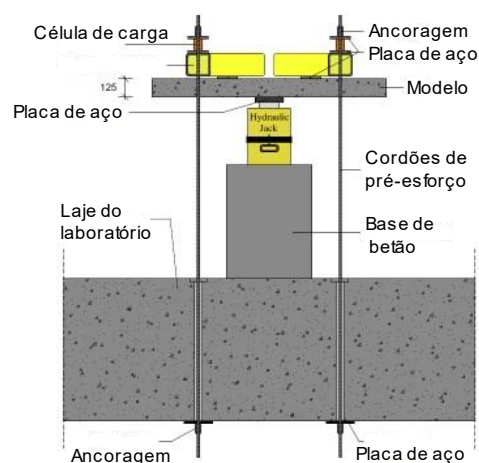
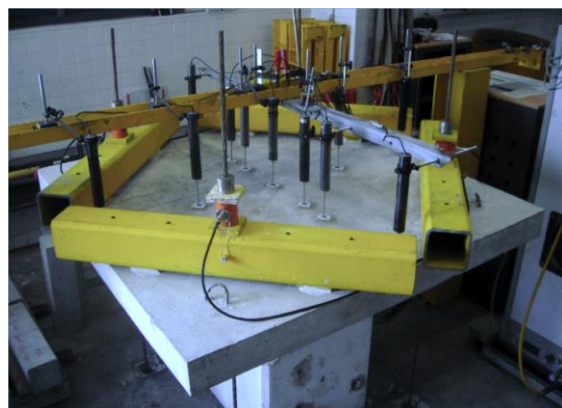


Figura 7 - Esquema de ensaio adotado por Gouveia et al. [6]

As principais conclusões de Gouveia et al. [6] foram:

- A adição de fibras influenciou positivamente o comportamento das lajes, nomeadamente na rigidez;

- A adição de fibras permitiu um incremento da capacidade de carga e na capacidade de deformação das lajes;

- Na laje com 1.25% de volume de fibras, observou-se um incremento da capacidade de carga até 64% quando comparado com a laje de referência (sem adição de fibras);

2.2.7. Inácio et al. - 2015

Inácio et al. [7] estudaram o comportamento ao punçoamento de lajes fungiformes constituídas por BER. A mistura de BER apresentava uma resistência à compressão de 130 MPa. Foram dimensionadas três lajes constituídas por BER e uma laje adicional de betão normal, que serviu como referência. Os modelos de laje eram quadrados com dimensões em planta de 1650x1650 mm² e uma espessura de 125 mm. A resistência do betão à compressão era de aproximadamente 35.9 MPa para o betão normal e 130.1 MPa para o BER. Fez-se variar a percentagem de armadura longitudinal entre 0.94% e 1.48%. A caracterização do BER foi realizada com recurso a ensaios de compressão e ensaios de tração à compressão diametral a cilindros com diâmetro 150 mm e altura de 300 mm. Na abela 3 apresentam-se as propriedades mecânicas dos betões de elevada resistência utilizados nos modelos de Inácio et al. [7]. Os modelos foram designados conforme o tipo de betão (SNSC para lajes com betão normal e SHSC para lajes com betão de elevado desempenho). Os ensaios expressos na Tabela 3 ocorreram no mesmo dia que o ensaio da laje que corresponde a cada provete cúbico.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas dos betões com fibras de aço utilizados nos modelos de Inácio et al. [7]

Modelo	SHSC1	SHSC2	SHSC3	SNSC
f_c [MPa] ⁽¹⁾	125.6	130.1	129.6	35.9
$f_{ct,sp}$ [MPa] ⁽²⁾	7.7	8.4	8.3	2.6
E [MPa] ⁽³⁾	54.4	55.5	54.4	32.6

⁽¹⁾ valor médio da tensão de rotura do betão à compressão em cilindros (150x300 mm²);

⁽²⁾ valor médio da tensão de rotura do betão à tração por compressão diametral;

⁽³⁾ valor médio do módulo de elasticidade;

O aparecimento das fendas de flexão nas lajes constituídas por BER deu-se para cargas entre os 130 kN e os 180 kN, enquanto nas lajes constituídas por betão normal se deu para valores de carga entre os 50 kN e os 80 kN. Este comportamento deve-se à melhor resistência à tração do BER. Nas lajes com BER, o incremento da percentagem de armadura longitudinal traduziu-se numa diminuição do deslocamento vertical, enquanto a rigidez da laje aumentou significativamente.

As principais conclusões de Inácio et al. [7] foram:

- A resistência do betão tem uma influência direta no comportamento de uma laje ao punçoamento. Se a resistência à compressão do betão aumentar de 36 MPa para 130 MPa, a resistência ao punçoamento aumenta 42%, quando comparado as lajes ensaiadas com uma percentagem de armadura longitudinal de 1.25%.

- Os resultados demonstram que o incremento da percentagem de armadura longitudinal de 0.94% para 1.48% traduz num aumento da resistência ao punçoamento em 13%.

2.2.8. Inácio et al. - 2020

Inácio et al. [8] estudaram o comportamento ao punçoamento de lajes constituídas por BER, constituindo este trabalho uma continuação do trabalho realizado por Inácio et al. [7]. A investigação consistiu no ensaio de quatro lajes constituídas por BER, na região de ligação laje-pilar, e uma laje constituída por betão normal. Os autores consideram que a utilização racional de BER no aumento da resistência ao punçoamento é fundamental e, tendo em conta que o material que compõe o BER é dispendioso, o seu uso tem de ser otimizado. Por esta razão, o objetivo passou por introduzir o BER na zona de ligação laje-pilar, enquanto a restante área foi constituída por betão normal. A região de BER não só foi limitada em área, como também em espessura. Os modelos de laje eram quadrados com dimensões em planta de 1650x1650 mm², com uma espessura de 125 mm.

A armadura longitudinal superior era constituída por varões de 12 mm de diâmetro, espaçados a 90 mm, como representado na Tabela 4. Esta armadura é praticamente equivalente, em percentagem, à armadura utilizada no modelo SHSC2 ensaiado no trabalho de Inácio et al. [7], logo os resultados podem ser comparáveis.

Tabela 4 - Características dos modelos de laje de Inácio et al. [8]

Modelo	ρ [%]	Região BER [mm]
SHSC2*	1.24	TOTAL
SNSC4*	1.25	-
SHSC5	1.25	950 x 950 x 42
SNSC6	1.25	-
SHSC7	1.26	575 x 575 x 42
SHSC8	1.25	576 x 575 x 42
SHSC9	1.25	950 x 950 x 42

* modelos dimensionados por Inácio et al. [8]

Dado que os modelos SHSC2 e SNSC4, investigados no anterior trabalho, apresentam a mesma percentagem de armadura longitudinal, os resultados podem ser comparados com os modelos do presente trabalho.

A espessura do BER de, aproximadamente, 42 mm, correspondente a um terço da espessura total da laje, com o objetivo de limitar a região de BER à zona comprimida da laje.

A caracterização do BER foi realizada com recurso a ensaios de compressão e ensaios à tração por compressão diametral em cilindros com um diâmetro de 150 mm e uma altura de 300 mm. Na tabela 5 são apresentadas as propriedades mecânicas dos betões de elevada resistência utilizados nos modelos de laje de Inácio et al. [7].

Os ensaios expressos na Tabela 5 ocorreram no mesmo dia que o ensaio da laje que corresponde a cada provete cúbico.

Tabela 5 - Caracterização do BER adotado por Inácio et al. [7]

Modelo	Betão normal			BER		
	f_c [MPa]	$f_{ct,sp}$ [MPa]	E [MPa]	f_c [MPa]	$f_{ct,sp}$ [MPa]	E [MPa]
SHSC2*	-	-	-	130.1	8.4	55,500
SNSC4*	35.9	2.6	32,600	-	-	-
SHSC5	58.0	4.0	40,200	118.5	8.0	53,100
SNSC6	23.0	2.5	31,500	-	-	-
SHSC7	24.7	2.6	34,000	127.3	7.2	53,000
SHSC8	38.9	3.1	35,700	125.2	7.5	53,800
SHSC9	39.1	2.8	37,200	125.8	7.9	52,500

* modelos dimensionados por Inácio et al. [8]

O aparecimento de fendas de flexão no modelo SHSC2, constituído unicamente por BER, deu-se para valores de carga próximas de 150 kN, enquanto nos outros modelos, o aparecimento das fendas deu-se para valores de carga entre 50 kN e 100 kN. Esta diferença deve-se ao facto de o modelo SHSC2 ter um melhor comportamento à tração, conferido pelo BER.

O deslocamento vertical no colapso para todas as lajes com BER foi similar, demonstrando que o uso limitado da quantidade de BER não afetou a capacidade de deformação das lajes.

Os autores enumeraram 3 possíveis grupos através da comparação entre os gráficos carga-deslocamento: a laje constituída apenas por BER (SHSC2), as lajes híbridas (SHSC5, SHSC7, SHSC8 e SHSC9) e as lajes constituídas por betão normal.

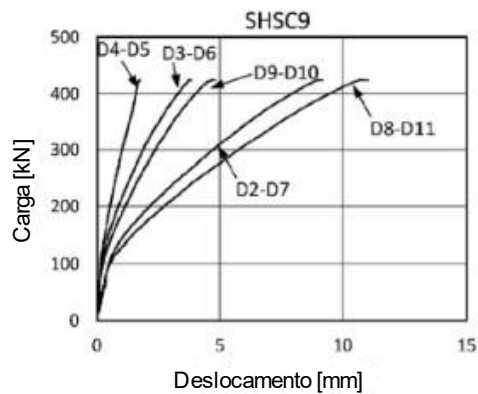
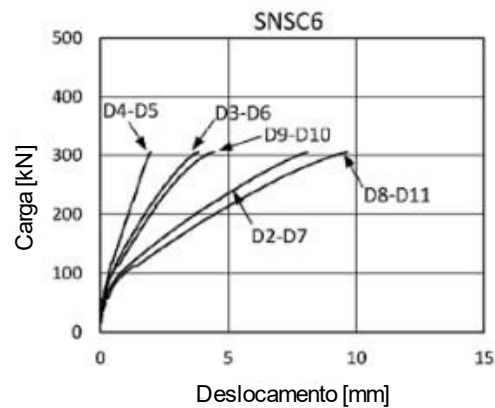
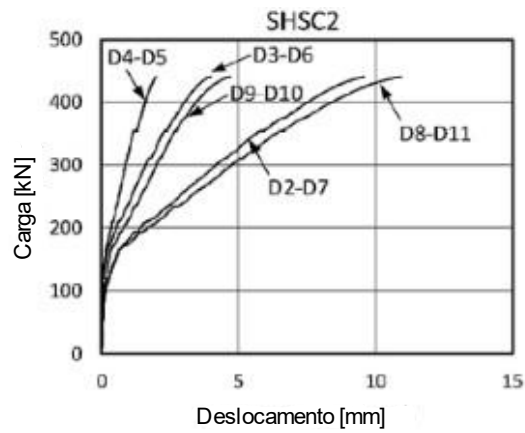


Figura 8 - Curvas carga-deslocamento dos modelos de Inácio et al. (adaptado de [8])

Como é possível observar na Figura 8, a curva carga-deslocamento do modelo SHSC2 apresenta características diferentes das outras curvas, por apresentar a maior carga de fendilhação e maior carga de colapso. A curva do modelo constituído por betão normal apresenta uma rigidez menor em relação às outras curvas. Os modelos híbridos são caracterizados por um comportamento intermédio. As cargas que representam a abertura de fendas equivalem às cargas que levaram à abertura de fendas nos modelos de betão normal. Apesar disso, a carga

de colapso e a capacidade de deformação registados são próximos dos valores do modelo SHSC2.

As principais conclusões de Inácio et al. [8] foram:

- O uso racional de BER demonstrou um excelente resultado em termos de aumento da resistência ao punçoamento. Ao limitar o BER a uma espessura menor que a espessura total da laje (correspondente à zona de compressão), a resistência ao punçoamento é aproximadamente igual à resistência obtida pela laje constituída apenas por BER.

2.2.9. Maya et al. e Muttoni et al.- 2012

Maya et al. [9] apresentaram um modelo mecânico que prevê a capacidade resistente ao punçoamento de lajes de betão reforçadas com fibras de aço (BRFA).

Os autores basearam-se num modelo desenvolvido por Muttoni [10] (Critical Shear Crack Theory - CSCT), no qual se apresenta que a abertura da fenda crítica de corte (w) é proporcional à rotação da laje (ψ) multiplicada pela altura útil da laje (d), tal como ilustrado na Figura 10. Este modelo assume que a resistência ao corte em elementos sem armadura transversal é condicionada pela abertura e pela rugosidade da fenda de corte que se desenvolve na escora inclinada.

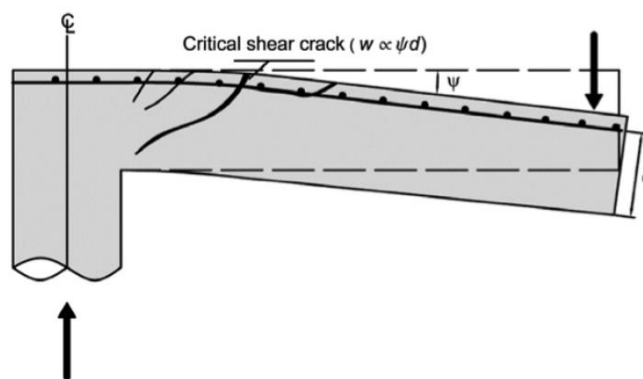


Figura 9 - Perímetro de rotura de punçoamento através da escora teórica de compressão

Muttoni e Ruiz Fernandez [11] referem que a resistência ao punçoamento é dada pela ação conjunta do betão e das fibras. A resistência ao punçoamento pode ser calculada pela soma de duas contribuições, como é apresentado na equação (2.7):

$$V = V_{R,c} + V_{R,f} \quad (2.7)$$

onde $V_{R,c}$ e $V_{R,f}$ são as contribuições do betão e das fibras.

A contribuição do betão e das fibras são ambas funções da abertura da fenda (w) crítica de corte, de acordo com a CSCT.

Tendo em conta o critério de rotura, Muttoni [10] apresenta uma expressão para o cálculo da resistência ao punçoamento (V_{Rm}) de lajes sem armaduras específicas de punçoamento. O autor verificou que a resistência ao punçoamento é proporcional à abertura de fendas, já que maiores fendas reduzem a contribuição da resistência à tração e do atrito entre os agregados, e conseqüentemente conduzem a uma diminuição da resistência.

Considerando os valores médios das características dos materiais, Muttoni [10] apresentou a equação (2.8):

$$\frac{V_{Rm}}{u \cdot d \cdot \sqrt{f_{cm}}} = \frac{3/4}{1 + 15 \cdot \frac{\psi_d}{16 + d_g}} \quad (2.8)$$

em que:

- d é a altura útil média da laje;
- u representa o perímetro de controlo a uma distância $d/2$ da face do pilar;
- f_{cm} é o valor médio da tensão de rotura à compressão do betão em provetes cilíndricos (MPa);
- ψ é a rotação da laje no momento da rotura;
- d_g é a máxima dimensão do agregado do betão;

Para determinar a resistência ao punçoamento e a capacidade de deformação da laje, é necessário conhecer a relação carga-rotação da laje. A carga e rotação última da laje, como se pode observar na Figura 11, dá-se quando a linha do critério de rotura (equação 2.8) e a curva carga-rotação se interseitam.

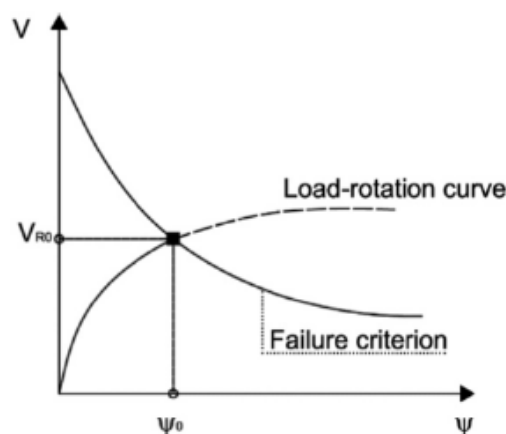


Figura 10 - Avaliação da resistência ao punçoamento e da capacidade de deformação de acordo com o CSCT

Muttoni [10] apresenta uma expressão que pode ser aproximada à equação (2.9), que estima a curva carga-rotação e onde se aplica o Nível III de cálculo (coeficiente 1.2), de acordo com o MC2010 [12]:

$$V = V_{flex} \left(\frac{\psi}{1.2 \frac{r_s \cdot f_y}{d \cdot E_s}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.9)$$

em que:

- r_s é a distância do eixo do pilar até à linha de momentos de flexão nulos;
- f_y é a tensão de cedência à tração do aço da armadura longitudinal (MPa);
- E_s é o módulo de elasticidade do aço da armadura longitudinal;
- V_{flex} é a força associada à resistência por flexão da laje (kN) ($\approx 8 \cdot m_R$ em punçoamento centrado);
- m_R é o momento resistente por unidade de comprimento;

A contribuição das fibras na resistência ao punçoamento pode ser calculada integrando a tensão nas fibras, segundo a equação (2.10), correspondente a cada fenda no perímetro crítico, assumida com um ângulo de 45° com o intradorso da laje [9]:

$$V_{R,f} = \int_{A_p} \sigma_{tf}(\omega(\xi)) dA_p = \int_{A_p} \sigma_{tf}(\omega, \xi) dA_p \quad (2.10)$$

em que:

- A_p é a área projetada no perímetro crítico de punçoamento;
- ξ é a distância vertical de um ponto relativamente ao intradorso da laje (altura útil);

De notar que a contribuição das fibras também é função da rotação da laje e da posição das fibras na laje.

A tensão de tração do BRF providenciada pelas fibras que compõe a mistura de betão, ao longo de um plano de área unitária σ_{tf} , desenvolvida por Voo e Foster [13], pode ser calculada através da equação (2.11):

$$\sigma_{tf} = K_f \cdot \alpha_f \cdot \rho_f \cdot \sigma_b \quad (2.11)$$

A orientação global das fibras K_f pode ser calculada através da equação (2.12):

$$K_f = \frac{1}{\pi} \cdot \arctan\left(\alpha_e \cdot \frac{w}{d_f}\right) \cdot \left(1 - \frac{2w}{l_f}\right)^2 \quad (2.12)$$

A tensão de aderência entre as fibras e a matriz de betão σ_b pode ser calculada através da equação (2.13):

$$\sigma_b = k_b \cdot \sqrt{f_c} \quad (2.13)$$

em que:

- α_f é a relação de aspeto das fibras;
- ρ_f é a percentagem volumétrica de fibras;
- d_f é o diâmetro das fibras;
- l_f é o comprimento das fibras;

2.3. Normas

Nesta seção são apresentadas as formulações para determinar a capacidade resistente ao punçoamento segundo descrito no EC2 [14] e no MC2010 [12].

O EC2 [14] determina a resistência ao punçoamento de uma laje num perímetro de controlo, u_1 , definido a uma distância $2d$ da área carregada.

O MC2010 [12] apresenta um modelo físico fundamentado na relação carga-rotação da laje, que determina a capacidade resistente ao punçoamento da laje.

2.3.1. Eurocódigo 2 - NP EN 1992-1-1

O Eurocódigo 2 [14] apresenta uma formulação para o cálculo da resistência ao punçoamento de uma laje. O valor de cálculo da resistência ao punçoamento sem armaduras específicas (V_{Rm}) segundo a NP EN 1992-1-1 é dada pela equação (2.14) e limitada pela equação (2.15):

$$V_{Rm} = (0.18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{cm})^{1/3} + 0.1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot u \cdot d \quad (2.14)$$

$$V_{Rm} \geq (0.035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} + 0.1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot u \cdot d \quad (2.15)$$

O parâmetro k pode ser calculado pela equação (2.16):

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2.0 \quad (d \text{ em mm}) \quad (2.16)$$

A taxa geométrica de armadura ρ_l é calculada através das taxas de armadura na direção x e y pode ser determinado pela equação (2.17):

$$\rho_l = \sqrt{\rho_{lx} \cdot \rho_{ly}} \leq 0.02 \quad (2.17)$$

A tensão de compressão do betão σ_{cp} pode ser calculado através das tensões na direção x e y , pela equação (2.18):

$$\sigma_{cp} = \frac{\sigma_{cx} + \sigma_{cy}}{2} \quad (2.18)$$

em que:

- f_{cm} é o valor médio da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias em provetes cilíndricos (150x300 mm²) (MPa);
- u representa o perímetro de controlo;
- c representa a largura do pilar;

Segundo o Eurócodigo 2 [14], o perímetro de controlo, u_1 , é definido a uma distância $2d$ da face do pilar ou da área carregada, conforme representado na Figura 12.

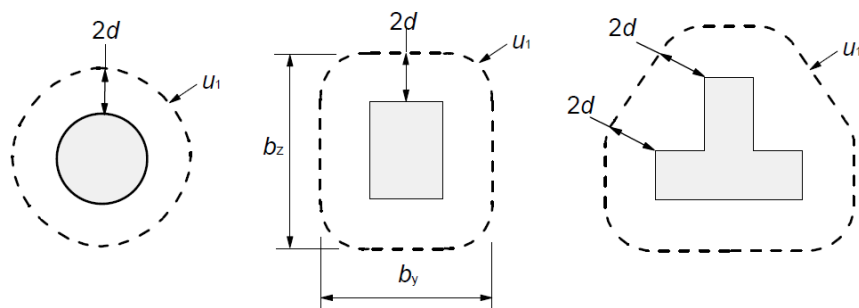


Figura 11 - Perímetros de controlo típicos em torno de áreas carregadas (adaptado de [13])

2.3.2. MC2010

Segundo o MC2010 [12], a resistência ao punçoamento pode ser calculada através da equação (2.19):

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s} \geq V_{Ed} \quad (2.19)$$

A contribuição do betão $V_{Rd,c}$ pode ser calculada através da equação (2.20):

$$V_{Rd,c} = k_{\psi} \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} \cdot b_0 \cdot d_v \quad (2.20)$$

O parâmetro k_{ψ} depende das deformações (rotações) da laje e pode ser calculado através da equação (2.21):

$$k_{\psi} = \frac{1}{1.5 + 0.9k_{dg} \cdot \psi \cdot d} \leq 0.6 \quad (2.21)$$

O parâmetro k_{dg} pode ser calculado através da equação (2.22):

$$k_{dg} = \frac{32}{16 + d_g} \geq 0.75 \quad (2.22)$$

em que:

- f_{ck} é o valor característico da tensão de rotura à compressão, em MPa, em provetes cilíndricos com 150 x 300 mm;
- γ_c é o coeficiente parcial de segurança;
- b_0 é o perímetro de controlo;
- d_v é o valor médio da altura útil média das armaduras longitudinais superiores;
- ψ é a rotação da laje no momento da rotura;
- d_g é a máxima dimensão do agregado;

A contribuição dos estribos $V_{Rd,s}$ pode ser calculada através da equação (2.23):

$$V_{Rd,s} = \sum A_{sw} \cdot k_e \cdot \sigma_{swd} \quad (2.23)$$

em que:

- A_{sw} é a área projetada no perímetro crítico de punçoamento;
- σ_{swd} é a tensão de tração (equação (2.24));

$$\sigma_{swd} = \frac{E_s \cdot \psi}{6} \cdot \left(1 + \frac{f_{bd}}{f_{ywd}} \cdot \frac{d}{\varphi_w} \right) \leq f_{ywd} \quad (2.24)$$

em que:

- φ_w é o diâmetro dos estribos;
- f_{bd} é a força de ligação que depende das características dos varões;

De acordo com o MC2010 [12] o cálculo das rotações em torno da área carregada pode ser estimado de acordo com quatro níveis de aproximação de cálculo. A escolha do tipo de nível depende da análise que estiver a ser realizada, do tipo de estrutura e da precisão que se pretende.

3.1. Introdução

No presente capítulo apresentam-se os modelos e respetivos ensaios de lajes realizados com o objetivo de estudar o comportamento da ligação laje-pilar recorrendo a um betão de elevado desempenho reforçado com fibras de aço.

Os modelos foram fabricados e ensaiados no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

3.2. Descrição dos Modelos

O programa experimental consistiu no ensaio de cinco modelos de lajes fungiformes maciças, com uma geometria octogonal em planta, com 2200 mm de lado e 150 mm de espessura, com a finalidade de simular a zona de momentos negativos junto ao apoio. Todos os modelos foram ensaiados até à rotura através de um carregamento vertical aplicado no centro, na superfície inferior, recorrendo a um macaco hidráulico equipado por uma placa de aço quadrada, garantindo a rigidez necessária para manter a superfície plana ao longo de todo o ensaio.

As principais variáveis em estudo foram a percentagem geométrica de armadura longitudinal e a geometria do BEDRF nos respetivos modelos.

A betonagem dos modelos seguiu uma ordem lógica desde a laje tipo (sem a introdução de fibras e sem BEDRF), a que se sucederam duas lajes com a mesma percentagem geométrica de armadura longitudinal (0.6%) com a variação da geometria do BEDRF (600 e 960 mm). Por último betonaram-se mais duas lajes com a mesma percentagem geométrica de armadura longitudinal (1%), com variação da geometria do BEDRF (600 e 960 mm).

Os modelos de laje foram denominados por HP0_R0.6, HP600_R0.64, HP960_R0.64, HP600_R1.0 e HP960_R1.0, sendo que HP corresponde a "High Performance" (elevada resistência) com a largura da zona, em mm, do betão de elevada resistência e R corresponde a "Reinforcement" (armadura longitudinal superior), com a respetiva percentagem de armadura longitudinal.



(a)



(b)

Figura 12 - Aspeto de um modelo de laje após (a) betonagem e (b) ensaio

3.3. Sistema de Ensaio

A geometria e sistema de ensaio utilizado para o ensaio dos modelos está esquematizado na Figura 12. O carregamento vertical foi efetuado recorrendo a um macaco hidráulico (ENERPAC RRH 1006 com 990 kN de capacidade máxima e 160 mm de curso máximo). Para controlo e incremento da pressão hidráulica recorreu-se a uma unidade de controlo de pressão hidráulica WALTER+BAI AG tipo NSPA 700/DIG 200, que garantiu a aplicação da força a uma velocidade de carga de 0,25kN/s.

O pilar foi simulado por uma chapa de aço quadrada, com 50 mm de espessura e 250 mm de lado. O sistema macaco acoplado com a chapa de aço está representado na Figura 13.



Figura 13 - Macaco hidráulico e pilar fictício

A laje foi apoiada em oito pontos, dispostos ao longo da linha de momentos nulos, através de chapas de aço, ligadas a vigas de reação através de cordões de pré-esforço, que estariam ligadas a barras de pré-esforço que posteriormente ligam à laje de reação do laboratório. Este esquema está representado na Figura 14.

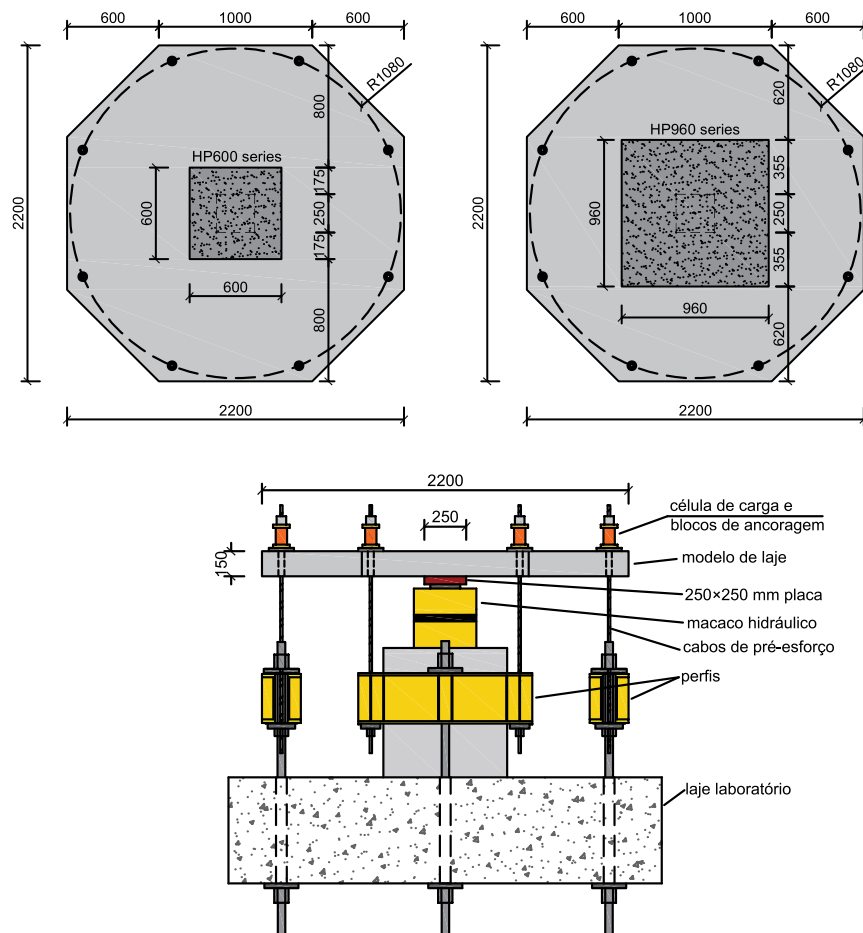


Figura 14 - Geometria e sistema de ensaio dos modelos

As chapas de aço com $150 \times 150 \times 20 \text{ mm}^3$, situadas em cada um dos oitos pontos, foram colocadas sobre uma camada de gesso, com a finalidade de nivelar a chapa e permitir uma distribuição uniforme de deformações. Esta chapa de aço foi atravessada por um cordão de aço de alta resistência, cuja fixação foi conferida por outra chapa metálica com $100 \times 100 \times 20 \text{ mm}^3$ tendo sido acoplada pelo sistema de ancoragem dos cordões, constituído por um cilindro e cunhas.

Através deste sistema foi possível garantir as condições de fronteira estáticas e cinemáticas, garantindo rotações livres nos bordos dos modelos, com o intuito de simular a linha de momentos nulos.

O dimensionamento da armadura longitudinal superior foi efetuado com a intenção de se obter uma rotura dos modelos por punçoamento. Para tal, adotou-se uma armadura longitudinal superior dos modelos HP600_R0.6 e HP960_R0.6 constituída por 13 varões de 12 mm de diâmetro em cada direção. Numa largura de $3d$ a partir da face do pilar, o espaçamento dos varões é menor que na restante laje, como é usualmente adotado no detalhe de lajes fungiformes. Para os modelos HP600_R1.0 e HP960_R1.0 a armadura longitudinal superior adotada consistia em 16 varões de 12 mm de diâmetro em cada direção. O espaçamento dos varões adotados é semelhante às lajes HP600_R0.6 e HP960_R0.6.

O dimensionamento da armadura longitudinal inferior dos modelos teve como principal objetivo minimizar a fendilhação dos modelos no seu transporte até ao local de ensaio. Para tal, adotou-se para a armadura inferior dos modelos HP600_R0.6 e HP960_R0.6, 13 varões de 10 mm de diâmetro, correspondente a uma malha de $\varnothing 10//0.2$ na região de betão normal e $\varnothing 10//0.15$ na região de BEDRF. Adotou-se para a armadura inferior dos modelos HP600_R1.0 e HP960_R1.0, 22 varões de 10 mm de diâmetro, correspondente a uma malha de $\varnothing 10//0.1$.

O recobrimento das armaduras superiores foi de aproximadamente 20 mm, para todos os modelos. A altura útil, d , dos varões da armadura superior, foi medida com recurso a um paquímetro digital, imediatamente antes da betonagem, e os resultados apresentam-se na Tabela 6. A Tabela 6 apresenta também as percentagens de armadura longitudinal superior ρ e a largura da zona de BEDRF expressa em valor numérico, bem como em múltiplo da altura útil d , desde a face do "pilar".

A informação referente às armaduras apresenta-se na Figura 15.

Tabela 6 - Características dos modelos

Modelo	d [mm]	ρ [%]	BEDRF [mm]	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

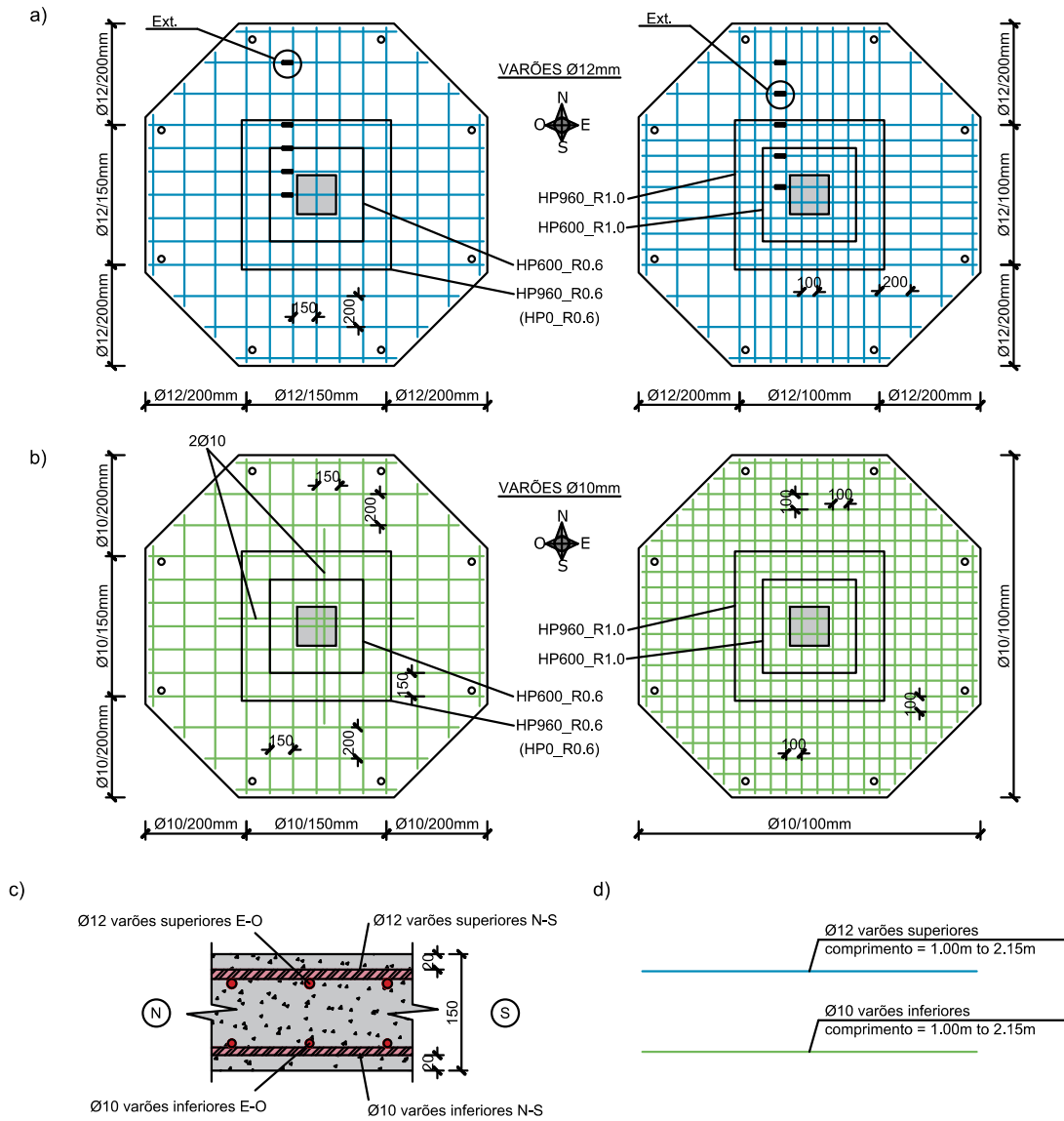


Figura 15 - Armadura longitudinal e extensômetros: a) varões superiores; b) varões inferiores; c) detalhe de seção de corte; d) detalhe da armadura

3.3.1. Instrumentação dos Ensaio

Nos ensaios das lajes realizados, foram monitorizadas as extensões de alguns varões da armadura longitudinal superior, os deslocamentos verticais (deformação do modelo) e a carga aplicada.

Após a colocação das malhas foram instalados extensómetros eléctricos, colocados tal como indicado nas Figuras 15 e Figuras 16. Em cada varão dos indicados, foram colocados dois extensómetros em posições diametralmente opostas, sendo que o par de extensómetros 1/2 é colocado no varão junto à face do pilar.

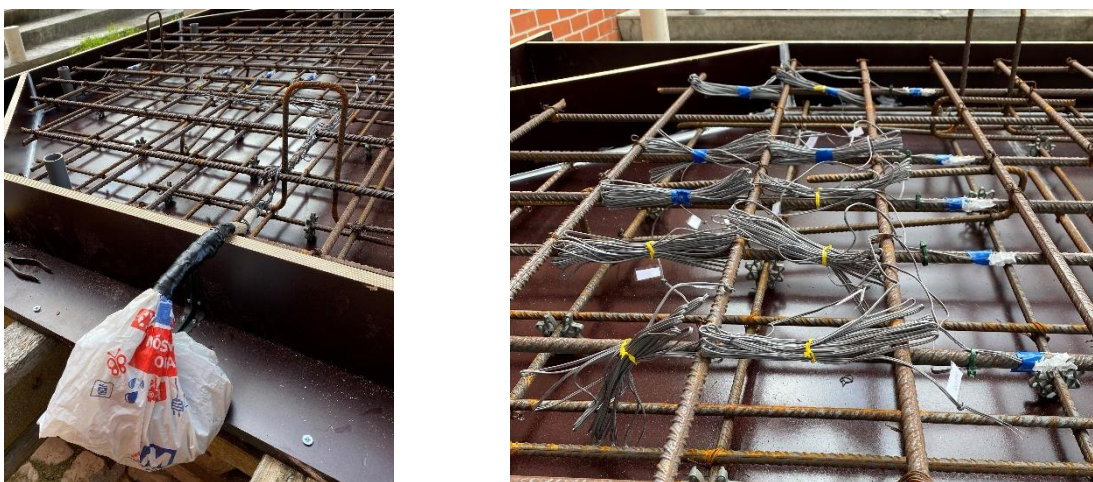


Figura 16 - Extensómetros eléctricos localizados na armadura superior

De modo a quantificar a carga vertical aplicada, foram instaladas oito células de carga, distribuídas pelos 8 apoios de laje. Foram utilizadas 6 células de carga do tipo CLC-200KNA e 2 do tipo CLC-300KNA, como ilustrado na Figura 17.



Figura 17 - Célula de carga CLC-200KNA

Para permitir monitorizar os deslocamentos verticais na face superior da laje, foram instalados 11 defletómetros elétricos da TML, conforme representado na Figura 18, que foram posicionados sobre dois alinhamentos perpendiculares. Para deslocamentos verticais na face inferior da laje, procedeu-se à instalação de 3 defletómetros de fio e apenas 1 defletómetro elétrico (ver Figura 18).

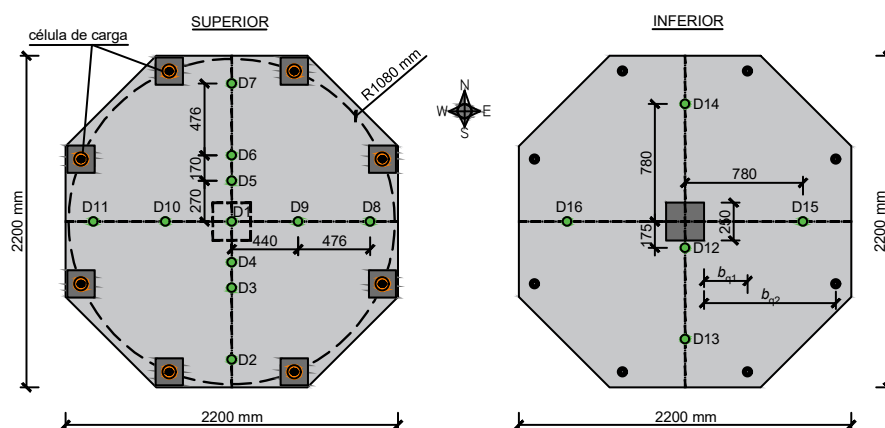


Figura 18 - Posicionamento dos defletómetros

Previamente à colocação dos defletómetros, e para que a rugosidade da laje não influenciasse de forma direta a medição dos deslocamentos, utilizaram-se pequenas placas quadradas de acrílico, que ficaram em contacto com as pontas dos defletómetros.

Os defletómetros D2 a D7 e D13 a D14 estavam alinhados com a direção de maior altura útil da armadura longitudinal superior, e os defletómetros D8 a D11 e D15 a D16 perpendicularmente à maior altura útil da armadura longitudinal superior.

Os defletómetros D4 e D5 tinham como objetivo observar se existiam descontinuidades na superfície de rotura, os defletómetros D2, D7, D8 e D11 foram posicionados perto do alinhamento de momentos nulos, e o defletómetro D1 foi posicionado no centro da laje. O defletómetro D12 foi colocado na face inferior da laje, na proximidade do pilar, de modo a analisar a diferença em relação ao defletómetro D1.

Na Figura 19 apresenta-se um pormenor da colocação de defletómetros na zona superior e zona inferior da laje, respetivamente.



Figura 19 - Defletómetros da TML colocados na face superior e inferior

3.4. Materiais

3.4.1. Betão convencional

A mistura de betão convencional foi produzida no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. A composição utilizada foi a mesma para todas as misturas diferenciando-se apenas na adição excecional do volume de água e plastificante.

O betão foi realizado numa betoneira de eixo vertical do modelo Mammuth, com uma capacidade máxima de 250 litros, representada na Figura 20.



Figura 20 - Betoneira utilizada na produção do betão

A compactação do betão normal foi efetuada utilizando dois vibradores elétricos portáteis com agulha, a funcionar em simultâneo, de modo a diminuir o número de vazios e de bolhas de ar.

3.4.2. Betão de Elevado Desempenho Reforçado com Fibras de Aço

3.4.2.1. Introdução

O Betão de Elevado Desempenho Reforçado com Fibras de Aço surgiu com a evolução e constante necessidade de aumentar a produtividade da indústria da engenharia civil. Em termos de resistência à compressão, o progresso tem sido notável, assim como na trabalhabilidade, na permeabilidade e na capacidade de deformação do betão. Dois exemplos são o Betão Auto-Compactável (BAC) e o Betão Reforçado com Fibras (BRF). A eliminação da necessidade de vibração do betão é vantajosa, reduzindo os custos de mão de obra associados à compactação do betão, assim como se traduz num aumento da qualidade e capacidade de deformação nas estruturas de betão. A introdução de fibras na composição do betão tem em conta a prevenção e diminuição da propagação de fendas, tanto em comprimento como em abertura.

A conjugação destes dois tipos de betão, aliados ao aumento da resistência à compressão, formam o BEDRF. Em geral, a adição de fibras a um betão de alta resistência melhora substancialmente as propriedades mecânicas do betão, particularmente na resistência à tração, à flexão e na capacidade de deformação do mesmo. Uma possível desvantagem da introdução das fibras será na trabalhabilidade do betão. Neste capítulo apresenta-se de forma sucinta os conceitos associados e comportamento mecânico do BEDRF.

3.4.2.2. Programa Experimental para Aferição da Composição do Betão

O betão utilizado no fabrico dos modelos ensaiados foi desenvolvido especificamente para utilização em lajes fungiformes, na região de ligação laje-pilar, no âmbito do projeto em que este trabalho se insere, por S. Nunes et al. [15].

Pretendia-se que a mistura fosse auto-compactável e atingisse uma resistência à compressão da ordem dos 90 a 120 MPa aos 28 dias [16].

Na composição das misturas utilizou-se o cimento calcário Portland CEM I 42.5R, produzido pela Secil. O produto é composto por uma percentagem de clínquer Portland entre 95-100% e uma percentagem de outros constituintes entre 0-5%. É caracterizado por uma resistência mínima à compressão aos 28 dias de 42,5 MPa e com uma classe de resistência normal aos primeiros dias, com um mínimo de 20 MPa aos 2 dias.

Os agregados utilizados foram um anfibolito triturado e uma areia siliciosa natural com uma máxima dimensão de 8 mm e 2 mm, para agregado grosso e fino, respetivamente.

Foi utilizada sílica de fumo (Elkem 940-U) e filer calcário (Betocarb UP-OU).

O adjuvante utilizado foi o Sika® Viscocrete®- 20HE, facultado pela Sika.

Foram utilizados três tipos de fibras de aço. As fibras Dramix® 5D 65/60 BG, apresentadas na Figura 21, à esquerda, são fibras retas com duplo gancho nas duas extremidades, com um comprimento total de 60 mm, uma esbelteza (l/d) de 65 e uma resistência à tração de 2300 MPa. As fibras Dramix® 4D 65/35 BG, são fibras retas com gancho nas duas extremidades, com um comprimento total de 35 mm, uma esbelteza (l/d) de 65 e uma resistência à tração de 1850 MPa. Estes dois tipos de fibras apresentam-se coladas em pente, que é utilizado tendo em conta o elevado comprimento e esbelteza apresentado por estas fibras [17], mas a cola que une estas fibras dissolve-se com a água da amassadura, sendo por isso recuperado o fator de forma das fibras individuais. As fibras Dramix® OL 13/20, apresentadas na Figura 21, à direita, caracterizam-se por serem fibras completamente retas, com um comprimento de 13 mm e um diâmetro de 0,2 mm. A resistência à tração é de 2750 MPa.

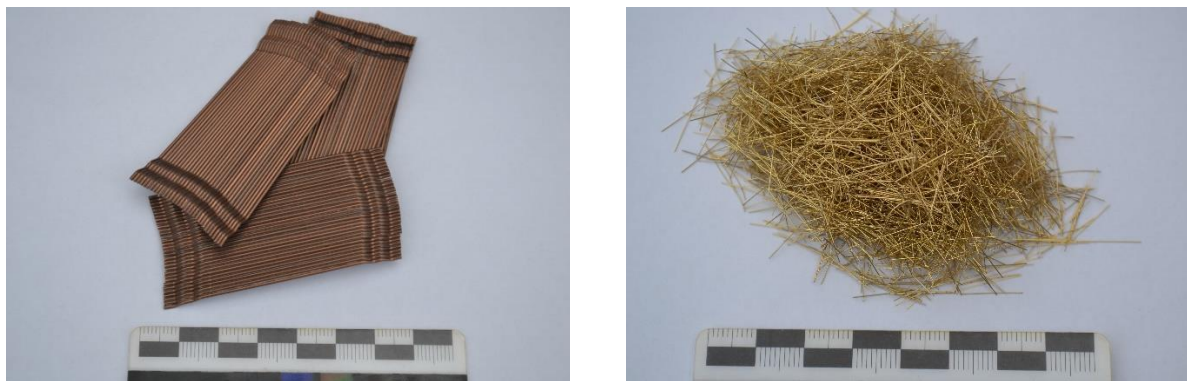


Figura 21 - Dramix® 5D 65/60 BG e Dramix® OL 13/20

A composição da mistura de betão apresenta-se na Tabela 7.

Tabela 7 - Composição da mistura de betão por S. Nunes et al. [10]

Materiais	Quantidade [kg/m ³]
Cimento	531.86
Filer calcário	203.72
Sílica de fumo	53.19
Água	147.85
Plastificante	12.55
Agregados finos	811.82
Agregados grossos	721.43
Fibras de aço	78.50

De seguida, os autores estudaram os benefícios da combinação de fibras para uma resposta pós-fendilhação. Foram analisados os três tipos diferentes de fibras, em combinação, com uma percentagem total de 1%, como se apresenta na Tabela 8.

Tabela 8 - Percentagem de cada tipo de fibras nas misturas realizadas por S. Nunes et al. [10]

Mix nº	% fibras		
	S	H4D	H5D
1	1	0	0
2	0.5	0.5	0
3	0.5	0	0.5
4	0	1	0
5	0	0.5	0.5
6	0	0	1
7	0.67	0.17	0.17
8	0.17	0.67	0.17
9	0.17	0.17	0.67
10	0.33	0.33	0.33
11 (=1)	1	0	0
12 (=4)	0	1	0
13 (=6)	0	0	1
14 (=10)	0.33	0.33	0.33

- Caracterização do estado fresco:

Após o processo de mistura, foi realizado o ensaio de abaixamento, de acordo com a EN 12350-8, de modo a avaliar o tempo necessário para alcançar 500 mm de diâmetro (t_{500}) e o diâmetro final total (D_{flow}). Estes parâmetros são apresentados na Tabela 9. Observa-se que as fibras do tipo S traduzem um efeito negativo na trabalhabilidade do betão, ao reduzir significativamente o D_{flow} e ao aumentar o t_{500} . Para um mesmo volume de fibras (1%), o número total de microfibras (tipo S) é maior comparativamente ao número total de macrofibras (H4D ou H5D).

Tabela 9 - Resultados da trabalhabilidade das misturas produzidas por S. Nunes et al. [15]

Mix nº	Resultados da trabalhabilidade		
	t500 (s)	Dflow (mm)	Classe de consistência
1	46.63	616.2	SF1
2	19.91	705.0	SF2
3	11.94	736.2	SF2
4	5.38	788.3	SF3
5	6.93	773.8	SF3
6	6.25	787.5	SF3
7	18.13	676.2	SF2
8	8.81	760.0	SF3
9	8.09	760.0	SF3
10	11.47	721.2	SF2
11 (=1)	42	598.8	SF1
12 (=4)	6.97	767.5	SF3
13 (=6)	6.72	783.8	SF3
14 (=10)	11.97	727.5	SF2

- Wedge Splitting Test (WST):

De seguida foram produzidos modelos (150x150x130 mm³) para o "Wedge Splitting Test" (WST) [18] [19], conhecido como um ensaio compacto de resistência à tração por flexão e que tem o objetivo de medir a energia de fratura do betão. A Figura 22 representa o sistema de ensaio. Os valores registados, no decorrer do ensaio, são a força de separação, F_{sp} e a abertura de fenda ("crack mouth opening displacement").

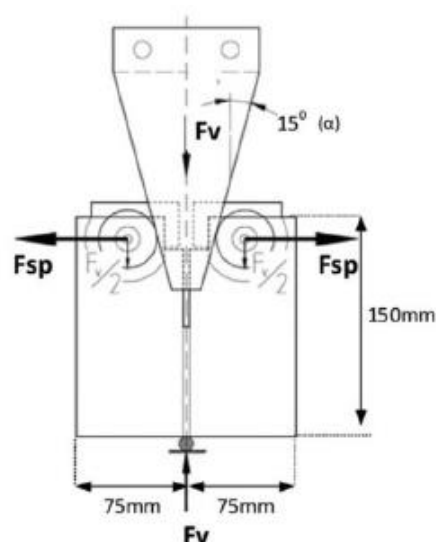
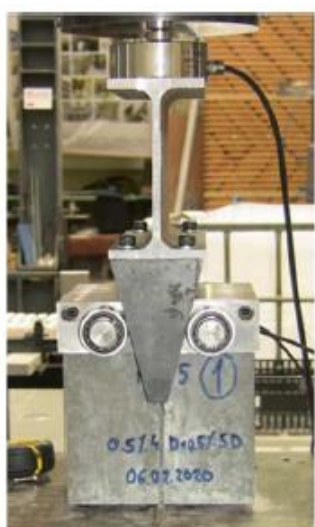


Figura 22 - Sistema de ensaio e esquema de forças do WST (adaptado de [10])

Através deste ensaio, os autores observaram a influência do tipo de fibra, através do seu comportamento mecânico e geométrico, no comportamento pós-fendilhação do BEDRF. Os

resultados, apresentados na Figura 23 (a), demonstram que as microfibras (tipo S) foram ativadas para fendas de menor abertura (valores de CMOD baixos), enquanto as macrofibras (H4D e H5D) foram ativadas para fendas tardias e, conseqüentemente, com maior abertura. Observou-se que as fibras H5D apresentam um melhor desempenho em relação às fibras H4D. Isto porque a menor ancoragem fornecida pelas fibras H4D, concebe um material com menor tensão de cedência, ocorrendo rotura nas próprias fibras. Assim, e para este material, as fibras H4D foram erradicadas por se considerarem insuficientes a evitar roturas durante o processo de fendilhação.

Na Figura 23 (b) foi possível observar que a mistura 2 é menos eficiente que a mistura 3.

Como explicado anteriormente, a presença de microfibras (tipo S) influencia diretamente o aparecimento das primeiras fendas e só posteriormente são solicitadas as macrofibras (H5D), pelo que se torna crucial a utilização de microfibras. A mistura 3 que continha estes dois tipos de fibras (S e H5D) foi a escolhida para prosseguir com os restantes ensaios, pois atinge o máximo valor de F_{sp} para o valor mais alto de CMOD, como apresentado na Figura 24.

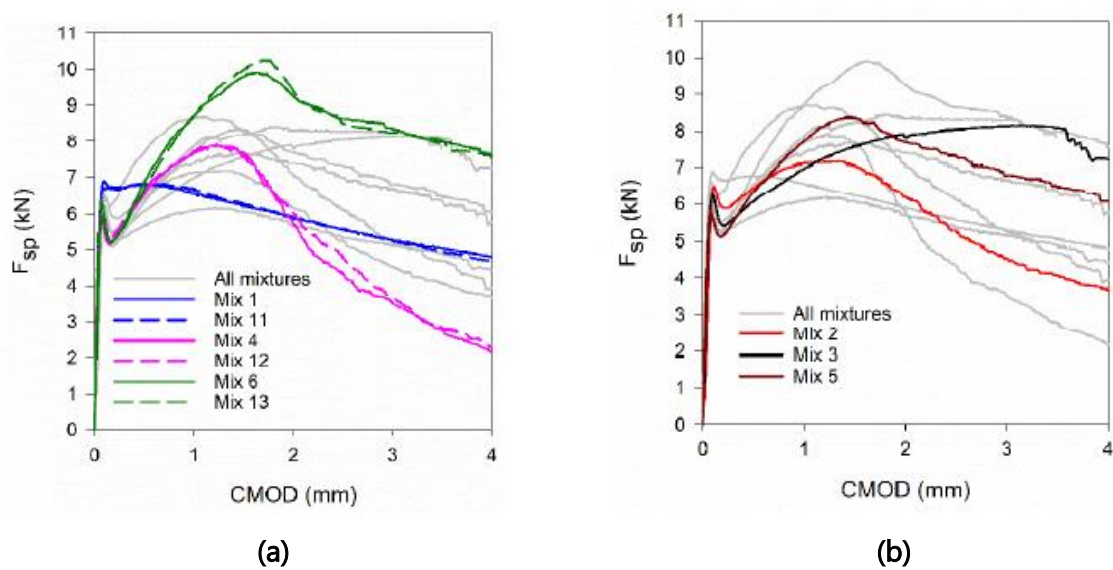


Figura 23 - Diagramas F_{sp} - CMOD, para (a) um tipo de fibra e para (b) dois tipos de fibras (adaptado de [10])

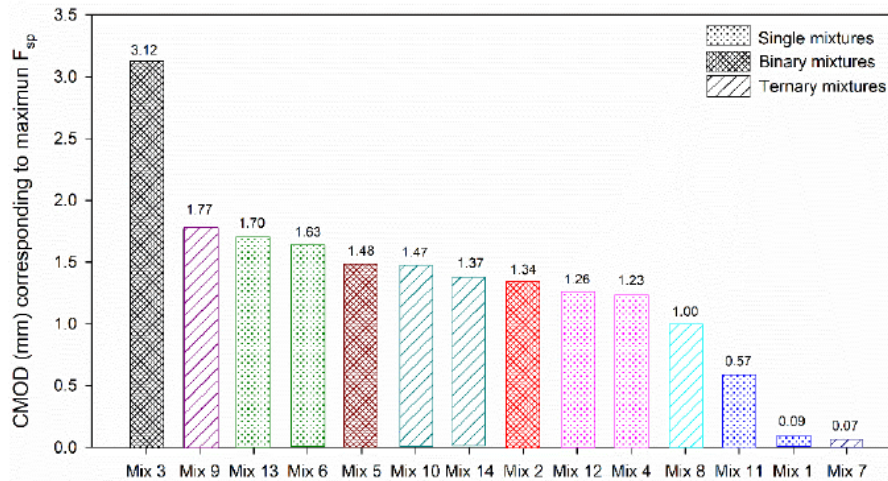


Figura 24 - CMOD correspondente ao máximo valor de F_{sp} (adaptado de [10])

3.4.2.3. Composição

A composição da mistura escolhida apresenta-se na Tabela 10.

Tabela 10 - Composição da mistura de BEDRF

Materiais	Quantidade [kg/m ³]
Cimento	531.86
Filer calcário	203.72
Sílica de fumo	53.19
Água	147.85
Plastificante	12.55
Agregados finos	811.82
Agregados grossos	721.43
Fibras de aço (5D 65/60 BG)	39.25
Fibras de aço (OL 13/.20)	39.25

O BEDRF apresenta comportamento frágil na resistência à tração comparativamente à resistência à compressão. No caso de um betão simples, o aparecimento de uma fenda ocorre quando a resistência à tração do betão é atingida. A introdução de fibras no betão apresenta uma enorme vantagem na medida em que estas interferem diretamente na capacidade de transferência de tensões após a fendilhação. As fibras funcionam como ponte de tensão nas fissuras, ao permitir a "passagem" de tensões através das mesmas. Este mecanismo promove a redistribuição das tensões pelo betão, diminuindo a concentração de tensões nas extremidades das fissuras [20].

A adição de fibras ao betão não induz qualquer influência no tipo de cimento usado, nem na reação química do cimento com a água [21].

3.4.2.4. Procedimento de amassadura

O processo de mistura é composto pelas seguintes etapas: (1) Misturar os agregados finos e grossos com 25% da água total de mistura, durante 2.5 minutos; (2) parar a mistura e esperar 2.5 minutos para que os agregados absorvam a água; (3) adicionar o cimento, o fíler, a sílica de fumo, o plastificante e a restante água com a betoneira a trabalhar e, posteriormente, misturar durante 5.0 minutos; (4) parar a betoneira para, com um varão, remover as bolhas de ar presentes na mistura; (5) adicionar fibras e misturar por 5.0 minutos.

3.4.3. Caracterização Mecânica

Para a caracterização mecânica do betão utilizado no fabrico dos modelos, realizaram-se ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral (apenas para betão normal) e módulo de elasticidade.

Procedeu-se à recolha de amostras do betão utilizado em cada modelo, como apresentado na Figura 25. Foram fabricados provetes cúbicos com 150 mm de lado, provetes cúbicos com 100 mm de lado e provetes cilíndricos com 150 mm de diâmetro de base e 300 mm de altura. A preparação e cura dos provetes foi realizada de acordo com as normas NP EN 12390-1 e NP EN 12390-2.



Figura 25 - Amostras de betão recolhidas em moldes cúbicos e cilíndricos e processo de recolha de amostra do betão BEDRF

3.4.3.1. Resistência à Compressão

Os ensaios foram realizados recorrendo a uma prensa FORM-TEST do tipo BETA2-3000E com uma capacidade máxima de 3000kN, apresentada na Figura 26. Os provetes cúbicos e cilíndricos foram ensaiados à compressão de acordo com a norma NP EN 12390-3.

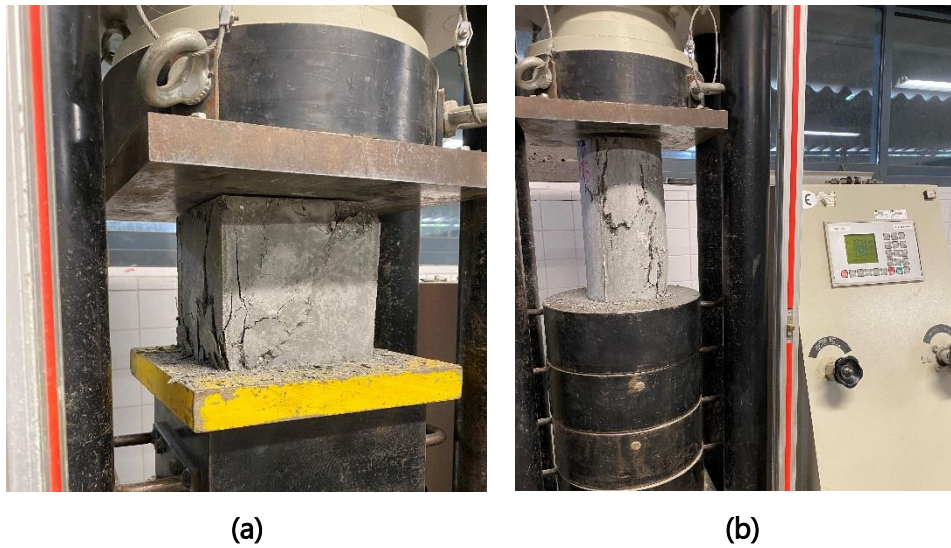


Figura 26 - Ensaio de compressão a provetes cúbicos (a) e cilíndricos (b)

O tipo de rotura obtido em provetes cúbicos de betão normal consistiu nas quatro faces expostas fissuradas de igual forma, enquanto as faces em contacto com os pratos apresentaram pequenos danos, conforme se pode observar na Figura 27 (a). Contrariamente, o BEDRF apresentou grande fendilhação apesar de não ter ocorrido grande destacamento do betão, conforme ilustrado na Figura 27 (b). Na Tabela 11 apresenta-se os valores da resistência à compressão em cubos, do betão que constitui os modelos de laje.



Figura 27 - Rotura de provetes cúbicos de betão normal (a) e BEDRF (b)

Tabela 11 - Resistência à compressão em cubos

Modelo	Betão normal	BEDRF	
	$f_{c,cubo150}$ [MPa] ⁽¹⁾	$f_{c,cubo150}$ [MPa]	$f_{c,cubo100}$ [MPa] ⁽²⁾
HP0_R0.6	25.4	N/D	N/D
HP600_R0.6	25.2	120	N/D
HP960_R0.6	30.1	129.5	130.1
HP600_R1.0	28.1	N/D	126.6
HP960_R1.0	23.8	N/D	124

⁽¹⁾ valor médio da tensão de rotura do betão à compressão em cubos (150x150x150 mm³);

⁽²⁾ valor médio da tensão de rotura do betão à compressão em cubos (100x100x100 mm³);

A rotura dos provetes cilíndricos de betão normal apresentou aproximadamente uma forma cónica, conforme a Figura 28 (a). No BEDRF, a rotura foi caracterizada por uma grande fendilhação, mas sem destacamento do betão, conforme ilustra a Figura 28 (b). Na Tabela 12 apresentam-se os valores da resistência à compressão em cilindros, do betão que constitui os modelos de laje.



(a)



(b)

Figura 28 - Rotura de provetes cilíndricos de betão normal (a) e BEDRF (b)

Tabela 12 - Resistência à compressão em cilindros

Modelo	Betão normal f_c [MPa] ⁽¹⁾	BEDRF f_c [MPa]
HPO_R0.6	24.4	N/D
HP600_R0.6	27.5	126.1
HP960_R0.6	26	127.7
HP600_R1.0	24.6	123.9
HP960_R1.0	25.5	118.1

⁽¹⁾ valor médio da tensão de rotura do betão à compressão em cilindros;

3.4.3.2. Resistência à Tração por Compressão Diametral

A resistência à tração por compressão diametral, foi obtida utilizando provetes cilíndricos com 150 mm de diâmetro e 300 mm de comprimento, segundo a norma NP EN 12390-6.

Para cada modelo, foram ensaiados três provetes de betão normal, com recurso à mesma prensa dos ensaios da resistência à compressão, como apresentado na Figura 29. Na Tabela 13 apresenta-se a resistência à tração por compressão diametral, do betão que constitui os modelos de laje.



Figura 29 - Ensaio e rotura à compressão diametral

Tabela 13 - Resistência à tração por compressão diametral

Modelo	Betão normal $f_{ct,sp}$ [MPa] ⁽¹⁾
HPO_R0.6	2.2
HP600_R0.6	2.2
HP960_R0.6	2.5
HP600_R1.0	2.2
HP960_R1.0	2.3

⁽¹⁾ valor médio da tensão de rotura do betão à tração por compressão diametral em cilindros;

3.4.3.3. Módulo de Elasticidade

Para o módulo de elasticidade, procedeu-se de acordo com a especificação LNEC E 397. Foi utilizada a mesma prensa dos ensaios à compressão e à tração por compressão diametral.

Os provetes utilizados para este ensaio foram os mesmos provetes cilíndricos ensaiados para obter a resistência à compressão, tendo sido realizado primeiro o ensaio de módulo de elasticidade, de modo a não causar dano aos mesmos. Este ensaio está representado na Figura 30. Na Tabela 14 apresentam-se os valores do módulo de elasticidade do betão que constituiu os modelos de laje.



Figura 30 - Ensaio ao módulo de elasticidade

Tabela 14 - Módulo de elasticidade

Modelo	Betão normal	BEDRF
	E [GPa] ⁽¹⁾	
HP0_R0.6	29	N/D
HP600_R0.6	29.5	51.5
HP960_R0.6	27.5	49.7
HP600_R1.0	25.1	49.3
HP960_R1.0	25.6	N/D

⁽¹⁾ valor médio do módulo de elasticidade;

4.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios dos modelos de laje, tendo como base a instrumentação descrita no Capítulo 3. Os tópicos a analisar foram: relação carga-deslocamento, com análise e comparação entre modelos; modos de rotura; deslocamentos verticais, onde é apresentada a evolução, através de deformadas, dos deslocamentos verticais para determinados níveis de carga; extensões na armadura longitudinal superior, através da evolução da extensão de alguns varões da armadura superior, em relação ao incremento da carga vertical.

4.2. Relação Carga - Deslocamento

Como referido na secção 3.3.1, foram instalados 11 defletómetros que permitiram determinar os deslocamentos relativos da laje em relação ao seu centro. É apresentado na Figura 31 o gráfico com a evolução dos deslocamentos verticais em função da carga vertical. O deslocamento u é obtido como a leitura relativa entre o defletómetro central D1 e a média dos defletómetros mais distantes do centro (D2, D7, D8 e D11). A carga V foi obtida como a soma das medições das oito células de carga no topo da laje, tendo em conta o peso próprio e os componentes colocados sobre a mesma.

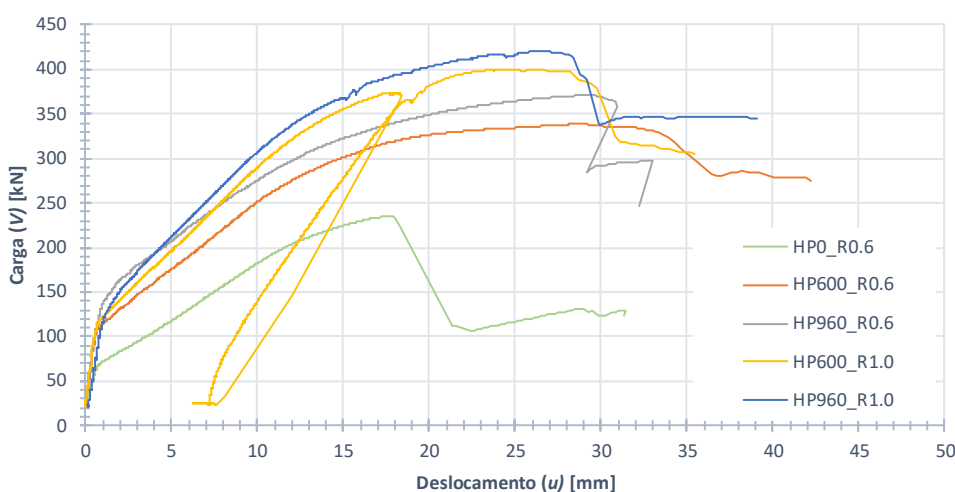


Figura 31 - Evolução dos deslocamentos verticais com a carga aplicada, para cada modelo

Na Figura 31, onde é representado o gráfico de evolução dos deslocamentos com a carga, é possível observar quatro fases distintas: a primeira corresponde a um comportamento praticamente linear, onde o betão e as armaduras apresentam um comportamento elástico e não se verifica qualquer fendilhação na laje; a segunda ocorre quando é atingida a resistência à tração do betão e surgem as primeiras fendas por flexão, traduzida pela diminuição progressiva de rigidez; a terceira caracteriza-se por um troço de rigidez constante, mas menor que a rigidez inicial, em que não ocorre a abertura de novas fendas, mas um aumento da abertura das já existentes; a quarta e última fase é marcada pela cedência das armaduras longitudinais, acompanhada pela perda de rigidez, até à rotura.

Observa-se que o incremento da área de armadura longitudinal superior, de $\rho = 0.6\%$ para $\rho = 1.0\%$, traduziu-se num comportamento pós-fendilhação com maior rigidez (maior inclinação do gráfico que representa os modelos). O incremento da largura da região do BEDRF não originou um significativo aumento na rigidez, no comportamento pós-fendilhação. Apesar disto, a capacidade de carga aumentou.

Observa-se que o modelo HP960_R0.6 apresenta uma rigidez maior, na primeira fase, que o modelo HP600_R1.0. Porém, o comportamento originado pela segunda fase implementou uma menor rigidez na terceira fase, no modelo com menor percentagem de armadura longitudinal.

Constata-se que os modelos HP600_R1.0 e o HP960_R1.0 apresentam uma maior rigidez em todas as fases, quando comparados com os restantes modelos.

No modelo HP600_R1.0 ocorreu um fenómeno de descarga-carga devido a uma falha técnica, como é possível observar na Figura 31. De acordo com Koppitz et al. [22], o ciclo descarga-carga normalmente tem pouca influência na resistência ao punçoamento de lajes fungiformes. Os efeitos são mais notados no carregamento após a descarga ter sido realizada e no caso de lajes finas e lajes com pouca armadura, o que não é o caso do modelo HP600_R1.0. Para além disto, o modelo depois do fenómeno descarga-carga, conseguiu igualar e até ultrapassar o valor de carga máximo observado previamente à descarga. Observando a Figura 31, o comportamento da descarga-carga é aproximadamente linear. Por estas razões, o efeito do ciclo descarga-carga não é relevante na interpretação dos resultados apresentados neste estudo.

4.3. Modos de Rotura

O modelo de referência (HP0_R0.6) apresentou uma típica rotura de um ensaio a lajes fungiformes sujeitas a forças de punçoamento verticais aplicadas monotonicamente, com o aparecimento de fendas radiais superiores após a carga de fendilhação, que se tornam mais evidentes no decorrer da aplicação da força. Na superfície inferior não se verificaram danos visíveis até ocorrer o colapso, quando a placa de aço penetrou a laje. O tipo de rotura do modelo HP0_R0.6 está representado na Figura 32. No corte realizado a este modelo, Figura 37, observa-se que ocorreu uma rotura por punçoamento.

Para os modelos com BEDRF, a primeira fenda surgiu na região de betão normal, para uma carga superior à verificada para o modelo de referência. Como seria de esperar, os modelos com menor percentagem volumétrica de armadura longitudinal, apresentam um maior número de fendas para o mesmo nível de carga imposto na laje.

No modelo HP600_R0.6, o primeiro fenómeno verificou-se num dos cantos do quadrado que representa o BEDRF: com o aumento da carga e, ao longo da direção NW – SE, ocorreu o destacamento do betão que ultrapassou até a região de BEDRF, com um pequeno desvio associado à presença do pilar fictício. O tipo de rotura do modelo HP600_R0.6 está representado na Figura 33. Os cortes representados na Figura 37 e 38a) apresentam informação adicional sobre o modo de rotura do modelo HP600_R0.6. Próximo à região de armadura inferior do lado Norte, a fenda de colapso ultrapassou a zona de BEDRF, enquanto em outros ângulos a fenda de colapso variou entre falha por corte e uma combinação entre flexão e corte.

No modelo HP960_R0.6, constatou-se que as primeiras fendas visíveis de flexão surgiram no betão convencional (sem fibras) que, posteriormente, se alastraram para o BEDRF, apesar da sua abertura ser menor. Apesar disto, o modelo apresentou uma rotura prematura por corte junto a um dos bordos da laje, mais precisamente em volta da célula de carga número 8. Através do corte na direção N-S, representado na Figura 37, é possível visualizar uma grande fenda na zona de BEDRF, que traduz uma possível proximidade do modelo à rotura por punçoamento. Esta fenda enfraqueceu a região da célula de carga levando ao colapso essa região. O tipo de rotura do modelo HP960_R0.6 está representado na Figura 34.

No modelo HP600_R1.0, as fendas radiais foram evidentes na direção perpendicular à menor altura útil do modelo. A rotura por punçoamento ocorreu fora da região HPFRC, onde foram afetados 3 lados do perímetro exterior à zona BEDRF. A delaminação do betão é perfeitamente visível na superfície superior, acompanhado por uma rotura típica ao punçoamento. Contrariamente ao modelo HP600_R0.6, o corte representado na Figura 40, demonstra que a fenda de corte por punçoamento na região BEDRF não foi detetada. O tipo de rotura do modelo HP600_R1.0 está representado nas Figuras 35 e 37.

No modelo HP960_R1.0, a redistribuição de forças de corte ao longo do perímetro fora da zona do HPFRC era ainda mais limitada devido ao grande perímetro da região BEDRF. Isso levou a uma rotura por corte junto da célula de carga, tal como ocorreu no modelo HP960_R0.6. O tipo de rotura do modelo HP960_R1.0 está representado na Figura 36. No entanto, através do corte ao longo da direção NS (Figura 37), a direção que apresenta menor altura útil de armadura, é possível verificar uma fenda que se desenvolveu também do lado sul, do lado oposto onde se observou o destacamento mais evidente do betão. Com o intuito de verificar se alguma fenda se tinha desenvolvido na direção perpendicular, foi realizado um corte adicional na direção E-W, como representado na Figura 38b), no qual não se detetou nenhuma fenda significativa.

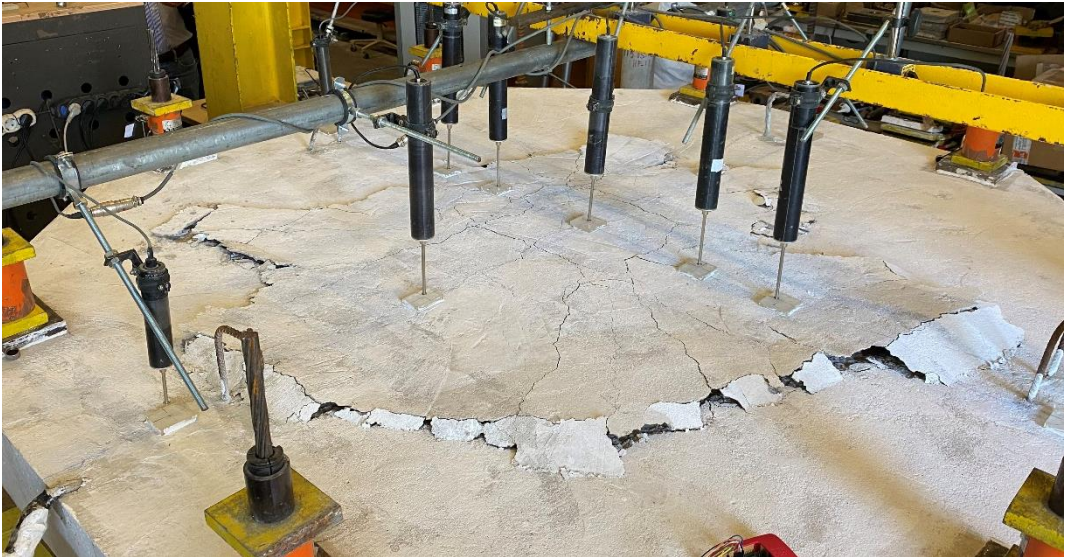


Figura 32 - Vista geral superior e inferior, respectivamente, do modelo HP0_R0.6



Figura 33 - Vista geral superior e inferior, respectivamente, do modelo HP600_R0.6



Figura 34 - Vista geral superior e inferior, respectivamente, do modelo HP960_R0.6



Figura 35 - Vista geral superior e inferior, respectivamente, do modelo HP600_R1.0



Figura 36 - Vista geral superior e inferior, respectivamente, do modelo HP960_R1.0

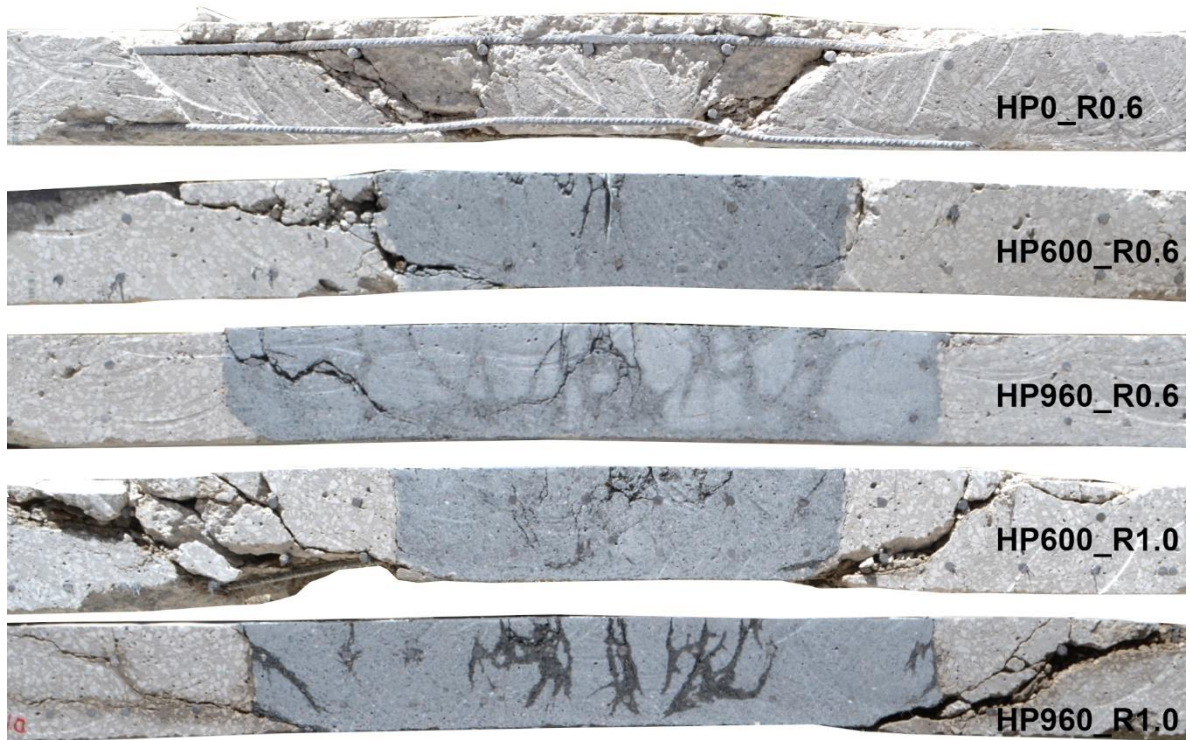


Figura 37 - Cortes nos modelos segunda a direção N-S

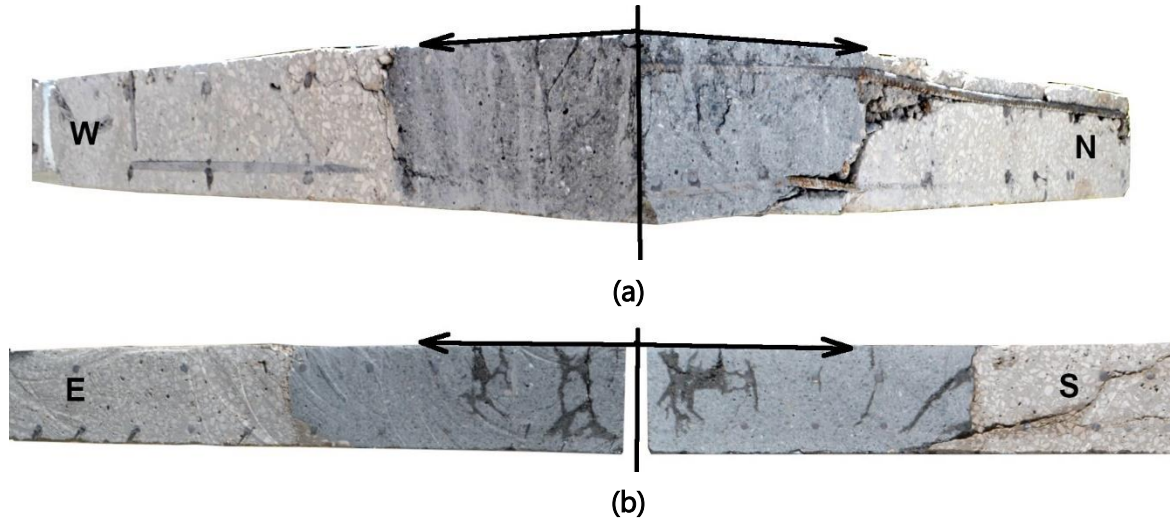


Figura 38 - Cortes em duas direções: a) modelo HP600_R0.6; b) modelo HP960_R1.0

Os cortes representados na Figura 37 e Figura 38 demonstram que a solução encontrada para a interface entre o BEDRF e o betão normal foi eficiente, ao apresentar um bom comportamento de ligação entre os dois betões. No entanto, devido à vibração, na zona inferior da ligação, pode observar-se que ocorreu a intrusão de betão normal na zona destinada a ser só de BEDRF.

4.4. Deslocamentos Verticais

Para uma melhor percepção dos resultados obtidos, apresentam-se em seguida as deformadas para vários patamares de carga, com um incremento de 50 kN e até à máxima carga registada.

4.4.1. Modelo HP0_R0.6

A Figura 39 apresenta a evolução dos deslocamentos verticais absolutos no decorrer do ensaio, para o modelo de referência. A curva inicia-se para um nível de carga igual ao peso próprio do modelo, que foi estimado em aproximadamente 21.5 kN. O deslocamento máximo relativo medido é de 19.0 mm, a uma distância de 440 mm do centro da laje, na direção com menor altura útil. Nas Figuras 40 e 41 é representado o aspeto do perfil transversal dos deslocamentos relativos deste modelo.

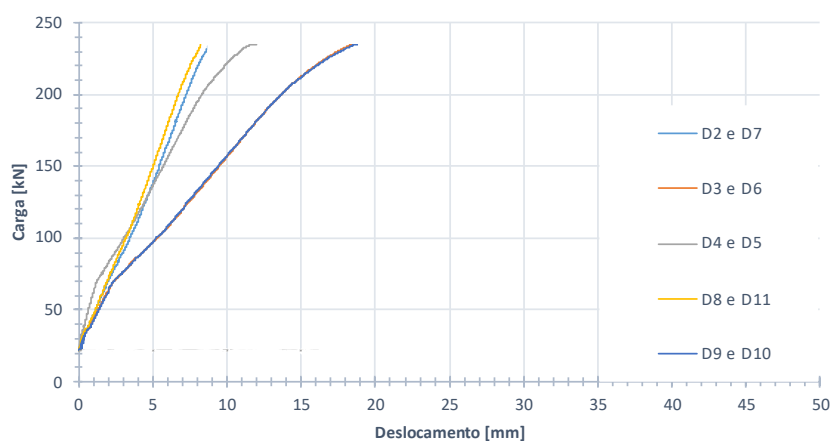


Figura 39 - Evolução dos deslocamentos verticais com a carga vertical para o modelo HP0_R0.6

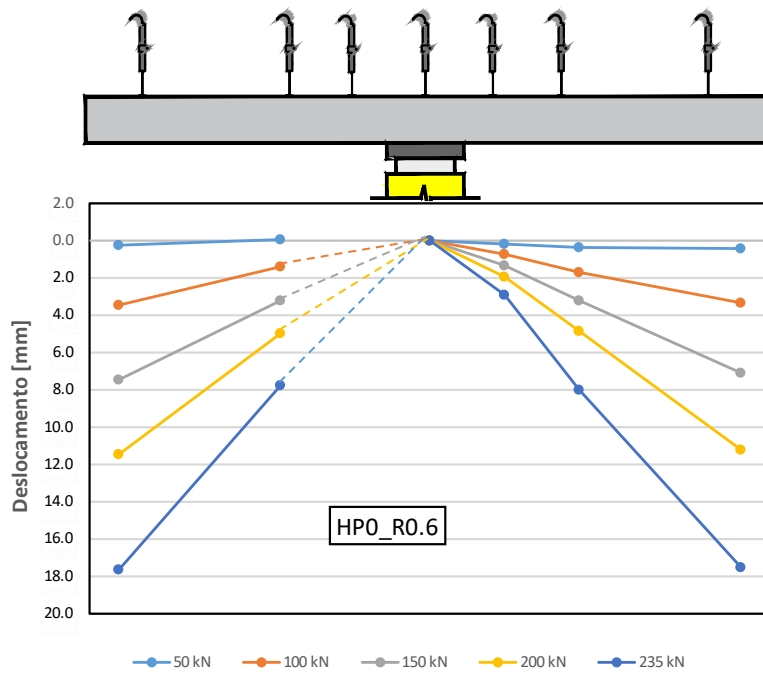


Figura 40 - Deformadas no modelo HPO_R0.6 para o alinhamento N-S

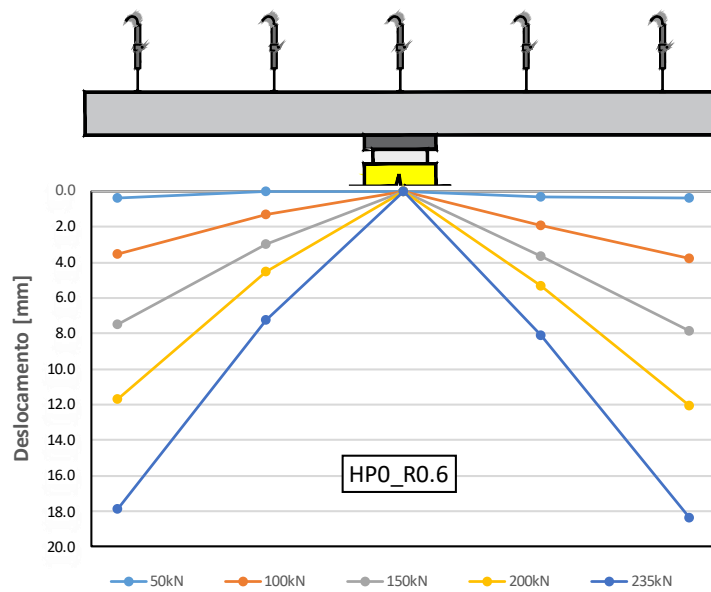


Figura 41 - Deformadas no modelo HPO_R0.6 para o alinhamento E-O

4.4.2. Modelo HP600_R0.6

A Figura 42 apresenta a evolução dos deslocamentos verticais absolutos do modelo HP600_R0.6. A carga inicial para este modelo é ligeiramente maior que para o modelo de referência devido ao incremento de peso do BEDRF. A carga estimada é de 21.6 kN. O deslocamento máximo medido é de 39.0 mm para um patamar de carga de 338.9 kN, a uma distância de 270 mm do centro da laje. Nas Figuras 43 e 44 é representado o aspeto do perfil transversal dos deslocamentos relativos deste modelo.

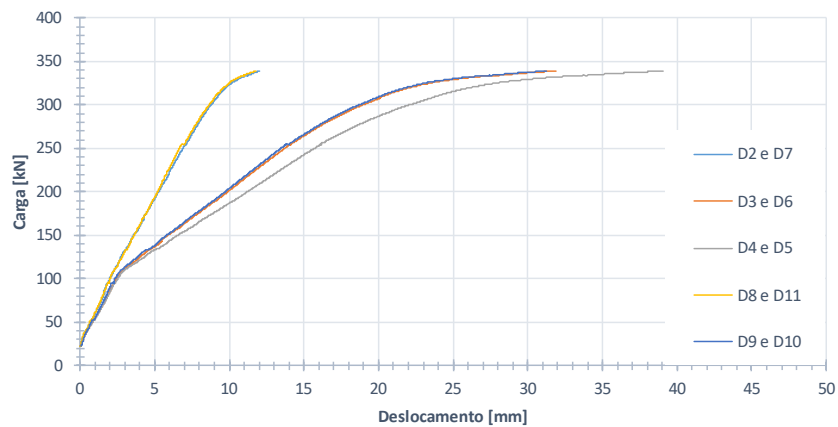


Figura 42 - Evolução dos deslocamentos verticais com a carga vertical para o modelo HP600_R0.6

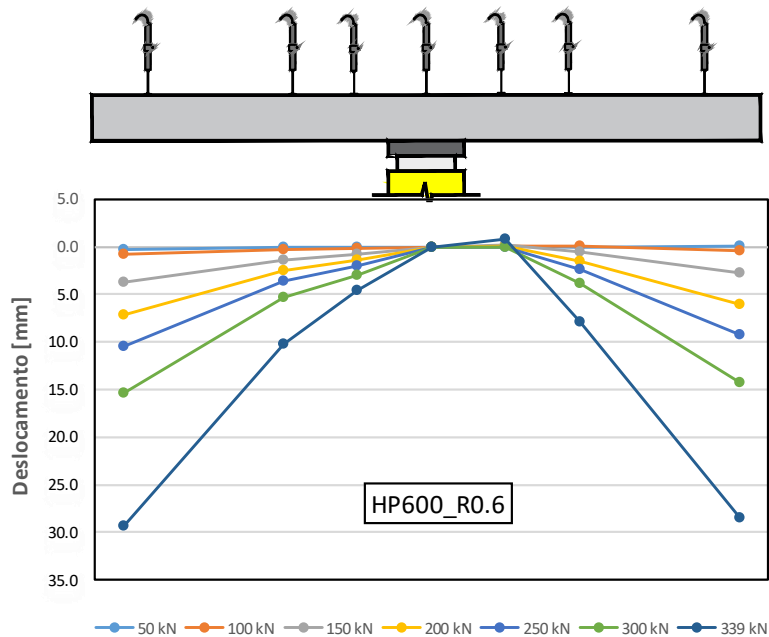


Figura 43 - Deformadas no modelo HP600_R0.6 para o alinhamento S-N

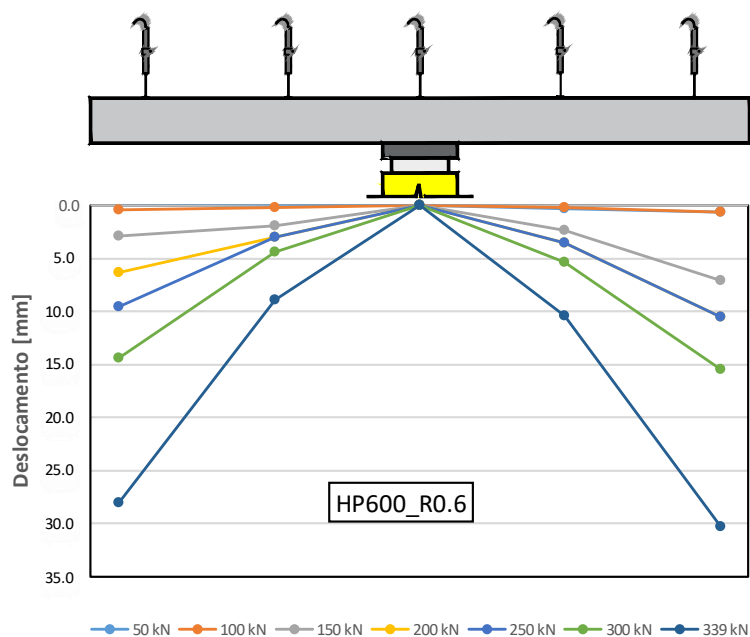


Figura 44 - Deformadas no modelo HP600_R0.6 para o alinhamento E-O

4.4.3. Modelo HP960_R0.6

A Figura 45 apresenta a evolução dos deslocamentos verticais absolutos do modelo HP960_R0.6. A carga inicial para este modelo foi de 21.7 kN, por comparativamente ao modelo HP600_R0.6, apresentar uma maior área de BEDRF. O deslocamento máximo medido é de 35.5 mm para um patamar de carga de 370.9 kN, a uma distância de 270 mm do centro da laje. Nas Figuras 46 e 47 é representado o aspeto do perfil transversal dos deslocamentos relativos deste modelo.

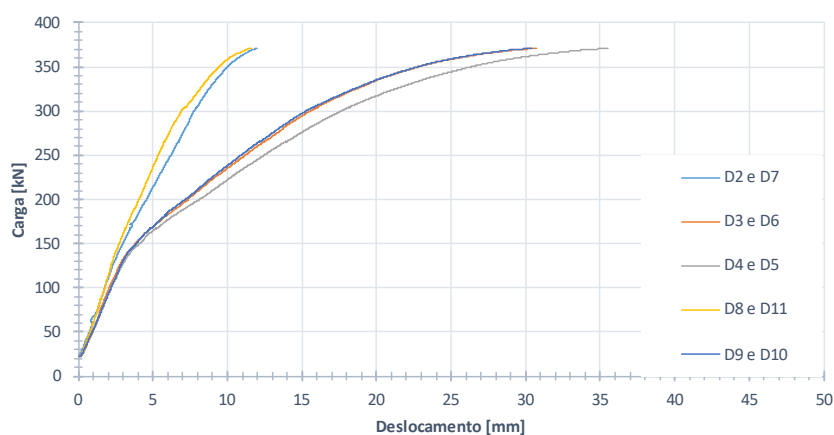


Figura 45 - Evolução dos deslocamentos verticais com a carga vertical para o modelo HP960_R0.6

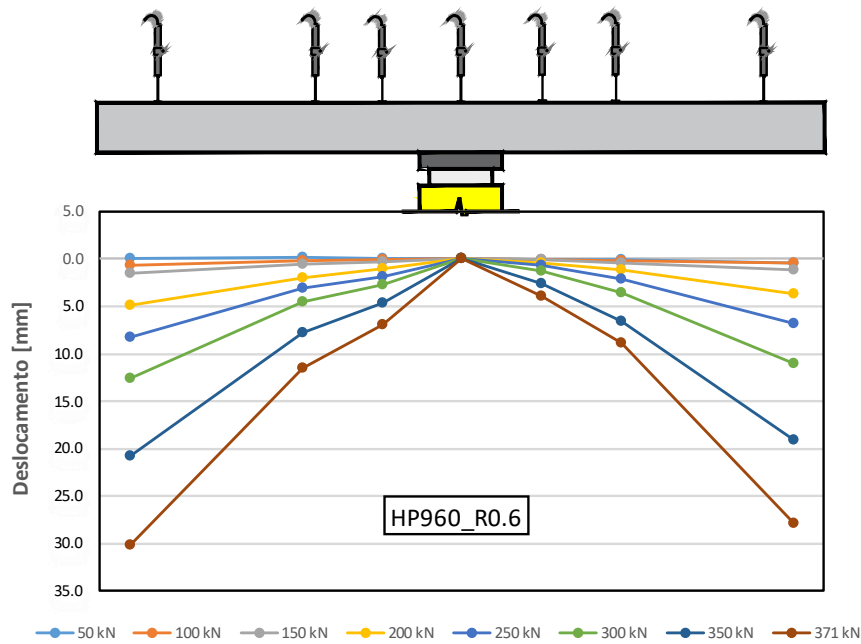


Figura 46 - Deformadas no modelo HP960_R0.6 para o alinhamento S-N

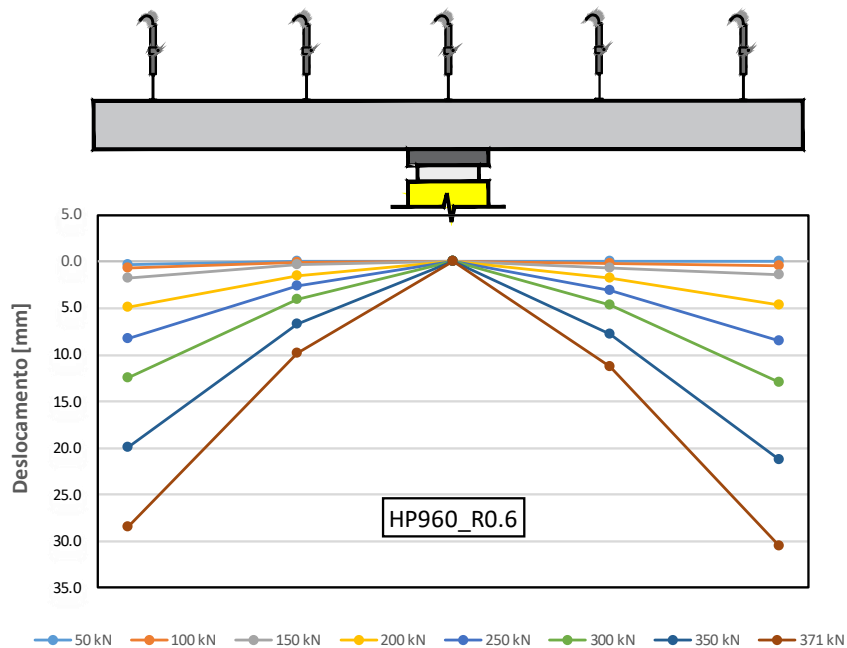


Figura 47 - Deformadas no modelo HP960_R0.6 para o alinhamento E-O

4.4.4. Modelo HP600_R1.0

A Figura 48 apresenta a evolução dos deslocamentos verticais absolutos do modelo HP600_R1.0. As curvas não têm início na origem pois este modelo sofreu uma fenômeno carga-descarga-carga, como descrito na seção 4.2. Assim, traçou-se o gráfico para um

carregamento após a descarga. A carga inicial deste modelo engloba dois parâmetros que traduzem um aumento do peso do sistema da laje: a zona BEDRF e a introdução de oito placas de aço sobre as células de carga com o intuito de redistribuir as tensões nessa região, dado que nos modelos anteriores o colapso ocorreu no bordo, junto da célula de carga. A carga estimada é de 21.7 kN. O deslocamento máximo medido é de 33.41 mm para um patamar de carga de 399.9 kN, a uma distância de 270 mm do centro da laje. Nas Figuras 49 e 50 é representado o aspeto do perfil transversal dos deslocamentos relativos deste modelo.

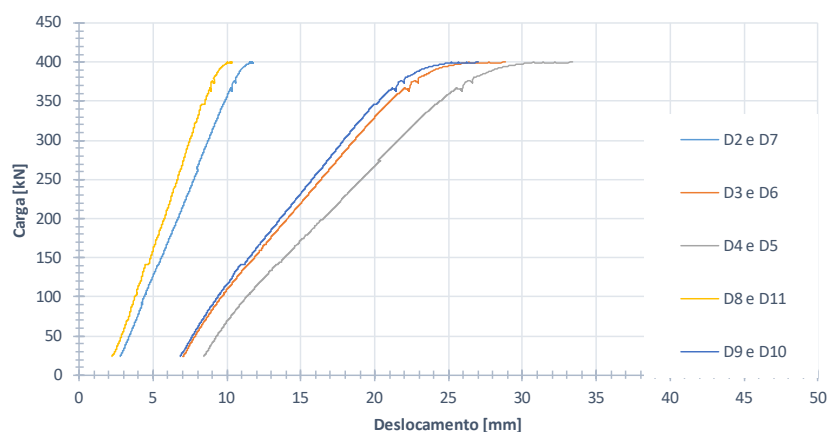


Figura 48 - Evolução dos deslocamentos verticais com a carga vertical para o modelo HP600_R1.0

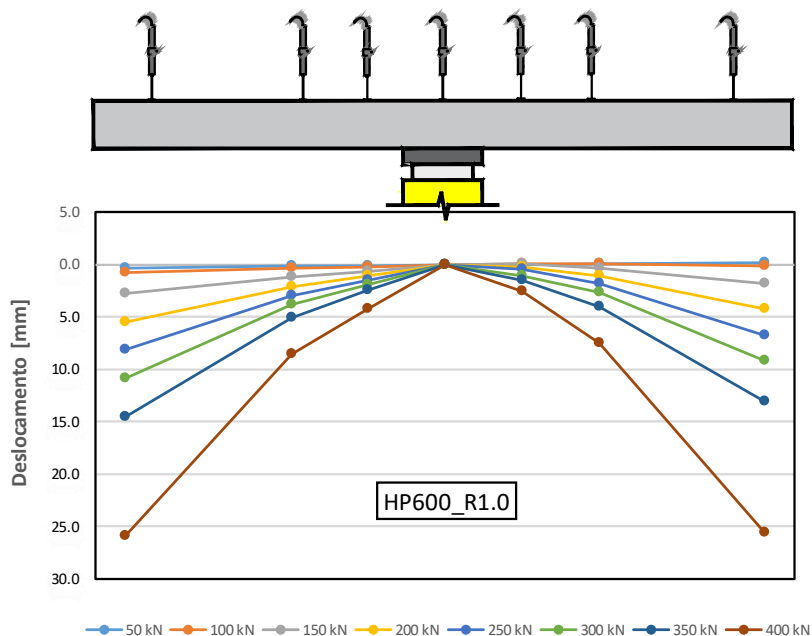


Figura 49 - Deformadas no modelo HP600_R1.0 para o alinhamento S-N

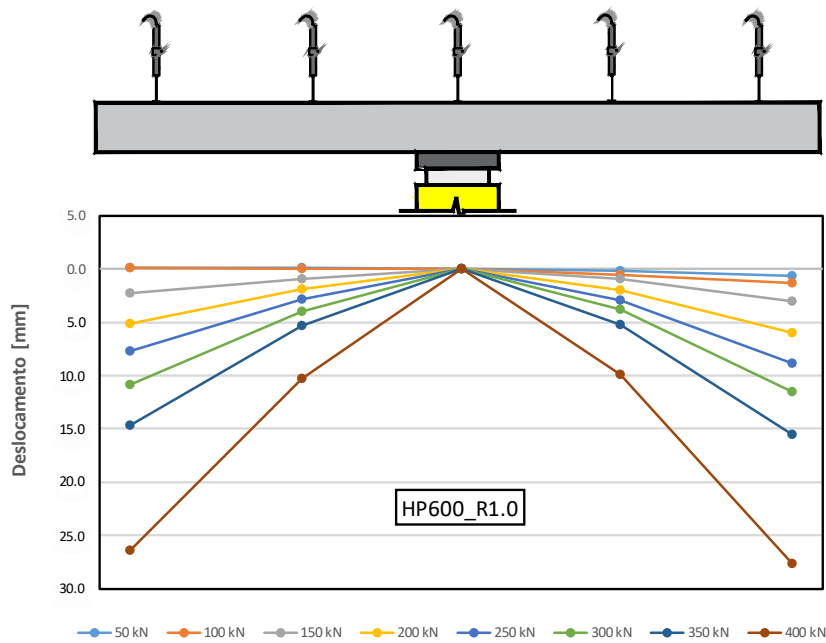


Figura 50 - Deformadas no modelo HP600_R1.0 para o alinhamento E-O

4.4.5. Modelo HP960_R1.0

A Figura 51 apresenta a evolução dos deslocamentos verticais absolutos do modelo HP960_R1.0. A carga foi estimada em 21.8. O deslocamento máximo medido é de 32.76 mm para um patamar de carga de 420.54 kN, a uma distância de 270 mm do centro da laje. Nas Figuras 52 e 53 é representado o aspeto do perfil transversal dos deslocamentos relativos deste modelo.

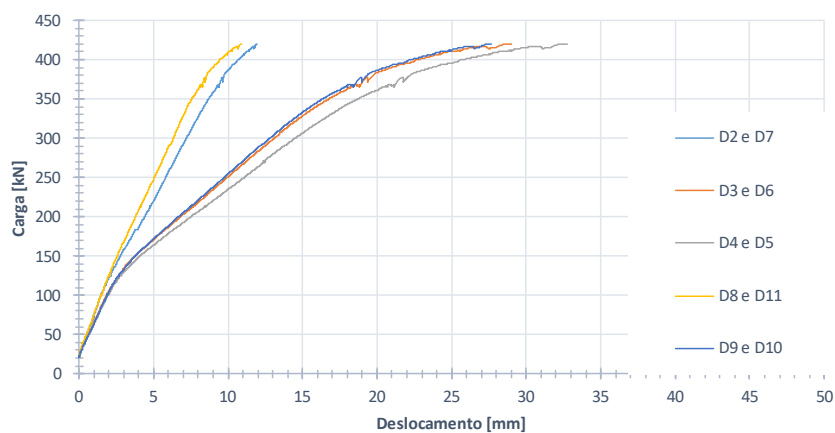


Figura 51 - Evolução dos deslocamentos verticais com a carga vertical para o modelo HP960_R1.0

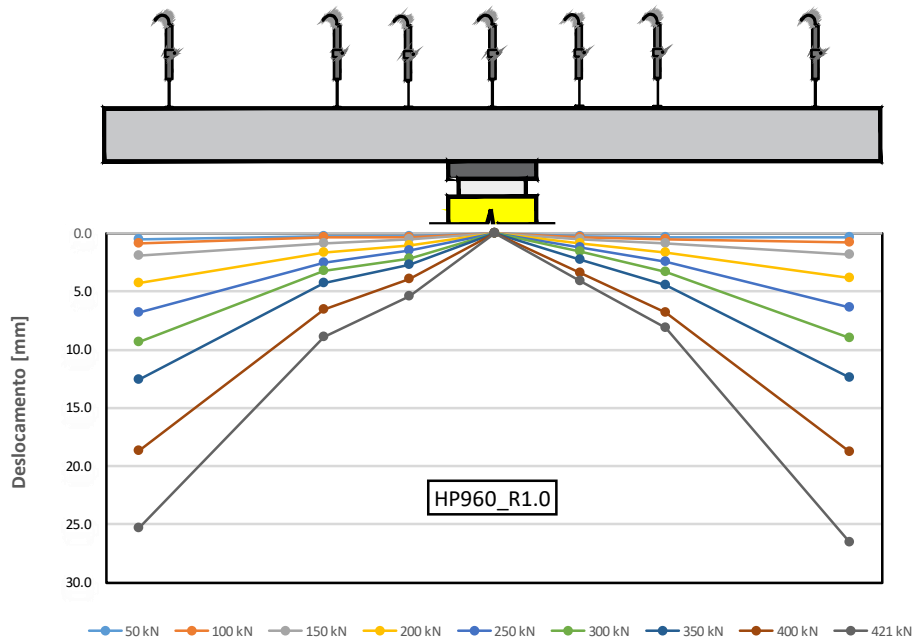


Figura 52 - Deformadas no modelo HP960_R1.0 para o alinhamento S-N

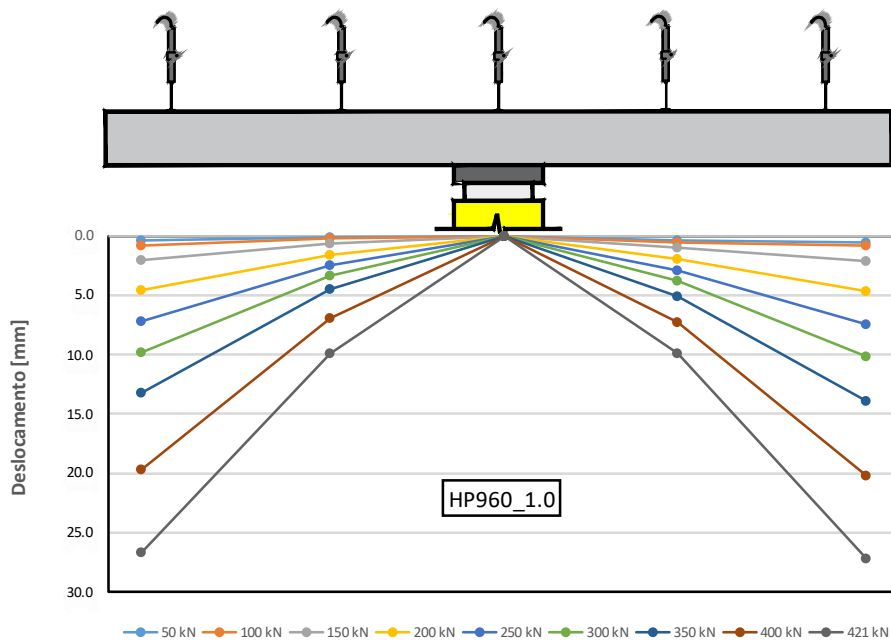


Figura 53 - Deformadas no modelo HP960_R1.0 para o alinhamento E-O

4.4.5.1. Considerações Finais

Comparando os deslocamentos ao longo das duas principais direções, constata-se que, para o modelo HP0_R0.6, o comportamento foi praticamente axissimétrico, onde os

deslocamentos foram equivalentes em ambas as direções. Apesar disto, os deslocamentos foram ligeiramente maiores na direção E-O.

Similarmente, os modelos com BEDRF apresentam deslocamentos semelhantes ao longo das duas direções.

Ao comparar os gráficos correspondentes aos modelos com a mesma percentagem de armadura longitudinal (o modelo HP600_R0.6, HP960_R0.6 e HP0_R0.6), observa-se que a introdução de uma região BEDRF junto à zona do pilar traduz-se numa redução dos deslocamentos para uma mesma força aplicada. Como esperado, os deslocamentos são menores quanto maior a região do BEDRF.

4.5. Extensões na Armadura Longitudinal Superior

Nesta secção é apresentada e analisada a evolução das extensões em 5 varões, de cada modelo, pertencentes à armadura longitudinal superior. Os extensómetros foram colocados nos varões da armadura longitudinal superior com menor altura útil, em cada modelo. Em cada varão instrumentado foram colocados dois extensómetros em posições diametralmente opostas, sendo a distância entre varões instrumentados, para os modelos HP0_R0.6, HP600_R0.6 e HP960_R0.6 de 150 mm, à exceção do extensómetro mais afastado do centro, que dista 400 mm. Para os modelos HP600_R1.0 e HP960_R1.0 os varões instrumentados distam em 200 mm, como é apresentado na Figura 15.

Foram elaborados gráficos com a evolução da extensão da armadura longitudinal instrumentada com o aumento da carga vertical aplicada.

Para cada modelo ensaiado, foram calculados os valores médios do par de extensómetros colados em cada secção de varão instrumentado. Na análise, os dados de alguns pares de extensómetros foram submetidos a um processamento do tipo "Ajuste Exponencial" de forma a remover leituras incorretas. Na Figura 54 apresenta-se um exemplo de análise e obtenção da curva resultante para os extensómetros 3 e 4 do modelo de referência. Observa-se que o extensómetro 4 apresenta um comportamento invulgar, pois com o aumento da carga vertical, a extensão diminui. O esperado seria o oposto. Assim, nos casos que apresentem esta invulgaridade, os valores das extensões correspondem à média das extensões lidas no par de extensómetros de cada varão, complementado por um processamento de dados, anteriormente explicado. A linha a preto é a solução que representa a evolução da extensão com o aumento da carga vertical aplicada.

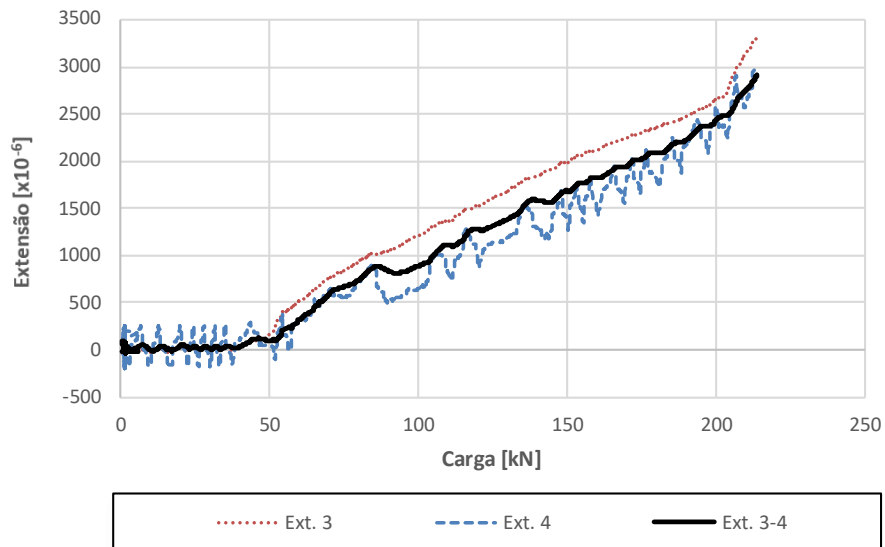


Figura 54 - Evolução da extensão na armadura superior com o aumento da carga vertical

4.5.1. Modelo HPO_R0.6

As Figuras 55 e 56 apresentam os resultados da evolução e os diagramas com a distribuição transversal das extensões da armadura longitudinal, respetivamente, para o modelo HPO_R0.6.

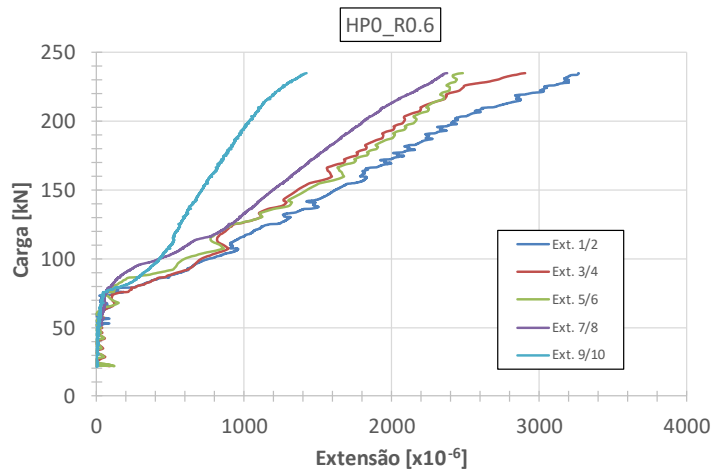


Figura 55 - Evolução da extensão na armadura superior do HPO_R0.6

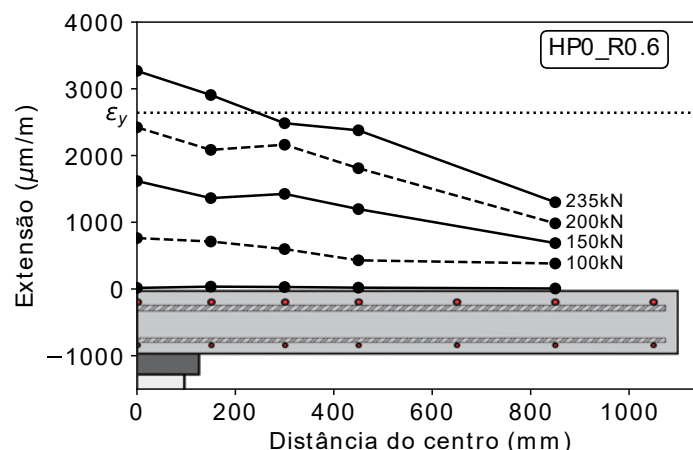


Figura 56 - Distribuição transversal das extensões da armadura longitudinal superior do modelo HP0_R0.6

Como esperado, a extensão aumenta com o incremento da carga vertical aplicada. O comportamento inicial é aproximadamente linear, até a uma carga de, aproximadamente, 70kN, onde se observa o início da fendilhação, simbolizado pela menor inclinação do gráfico das extensões em função da carga. A extensão que caracteriza o aparecimento de fendas ocorre, primeiramente, no par de extensómetros do varão mais próximo do "pilar".

Através do diagrama de distribuição transversal da extensão dos varões instrumentados, observa-se que os varões com maior extensão são os mais próximos do ponto de aplicação da carga, pois como seria de esperar, as extensões são proporcionais aos esforços.

4.5.2. Modelo HP600_R0.6

As Figuras 57 e 58 apresentam os resultados da evolução e os diagramas com a distribuição transversal das extensões da armadura longitudinal, respetivamente, para o modelo HP600_R0.6.

Na fase de pré-fendilhação, traduzida pela linearidade do gráfico que representa a evolução da extensão com o incremento de carga, é visível a perda de rigidez da laje para valores próximos de 110 kN, com o conseqüente aparecimento das primeiras fendas. Para um carregamento de cerca de 180 kN, ocorre um acréscimo significativo da extensão nos varões que se encontram mais longe do "pilar", constatando-se o aparecimento de fendas nessa zona.

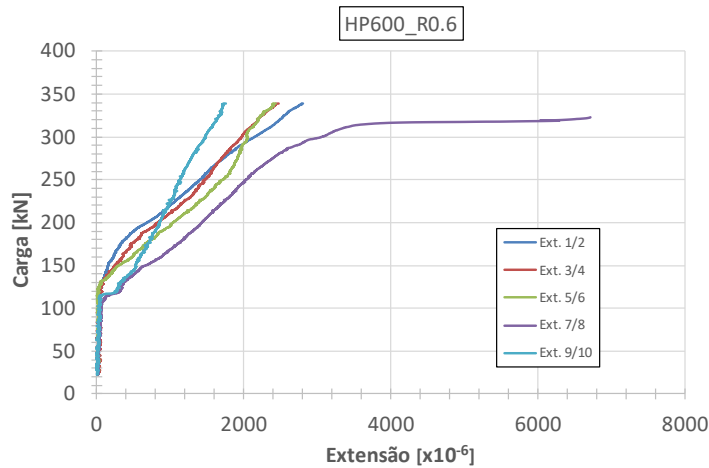


Figura 57 - Evolução da extensão na armadura superior do HP600_R0.6

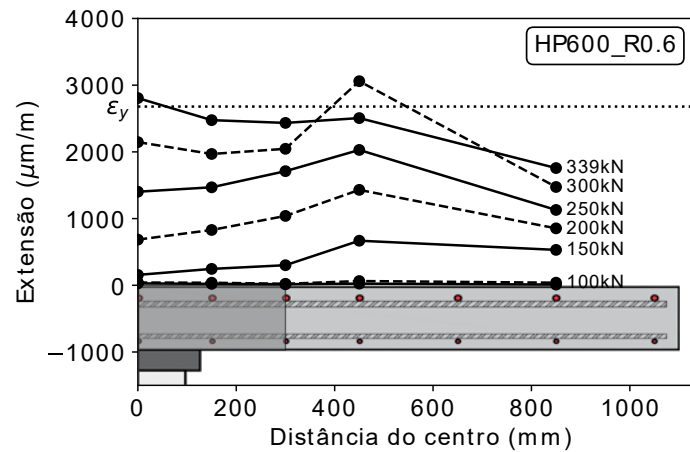


Figura 58 - Distribuição transversal das extensões da armadura longitudinal superior do modelo HP600_R0.6

A distribuição transversal das extensões na armadura longitudinal superior revela um aumento das extensões à medida que os varões estão mais próximos do "pilar", para o valor de carga correspondente ao colapso. Para valores de carga que antecedem a carga de colapso, o varão que contém o par de extensômetros 7/8, apresenta o maior valor de extensão. Este fenómeno atípico deve-se à elevada fendilhação verificada até esta fase do ensaio, que se traduz numa irregularidade na distribuição transversal de extensões da armadura longitudinal superior.

4.5.3. Modelo HP960_R0.6

As Figuras 59 e 60 apresentam os resultados da evolução e os diagramas com a distribuição transversal das extensões da armadura longitudinal, respetivamente, para o modelo HP960_R0.6.

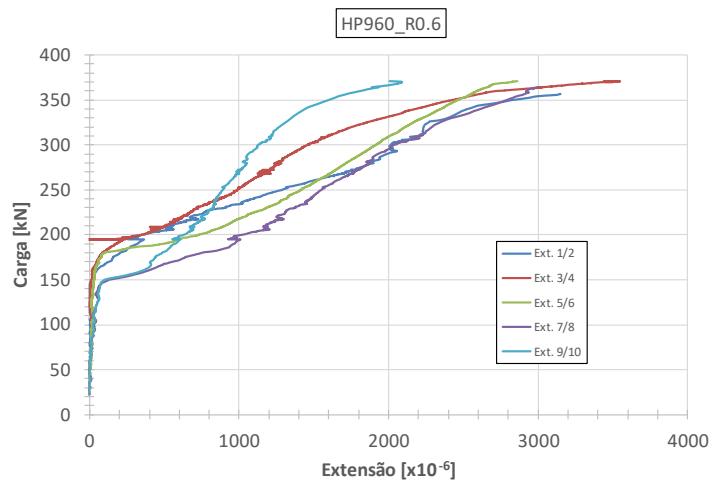


Figura 59 - Evolução da extensão na armadura superior do HP960_R0.6

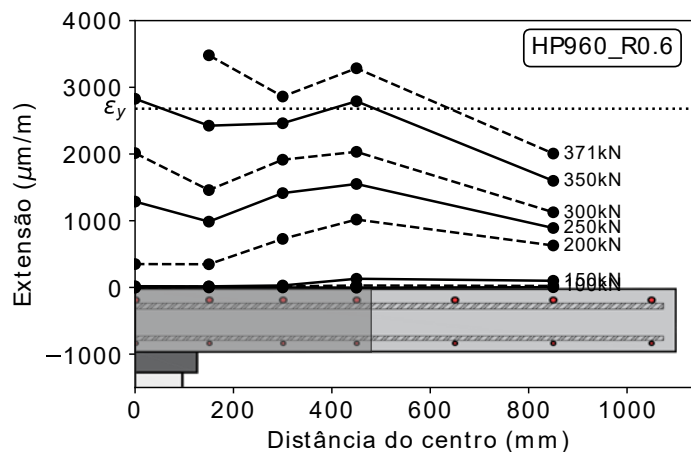


Figura 60 - Distribuição transversal das extensões da armadura longitudinal superior do modelo HP960_R0.6

Neste modelo, a não-linearidade e consequente perda de rigidez ocorreu nos varões que se encontram mais longe do "pilar", que correspondem aos pares de extensómetros 3/4, 5/6 e 7/8. O aparecimento de fendas ocorreu, assim, na região de betão normal. Através deste fenómeno, esta região apresentava-se bastante enfraquecida, onde se deu origem à rotura prematura junto ao bordo.

Em relação à distribuição transversal das extensões, verifica-se um aumento das extensões à medida que os varões estão mais próximos do "pilar", à exceção das cargas inerentes à perda de rigidez do modelo, ou seja, depois da fase aproximadamente linear.

4.5.4. Modelo HP600_R1.0

As Figuras 61 e 62 apresentam os resultados da evolução e os diagramas com a distribuição transversal das extensões da armadura longitudinal, respetivamente, para o modelo HP600_R1.0.

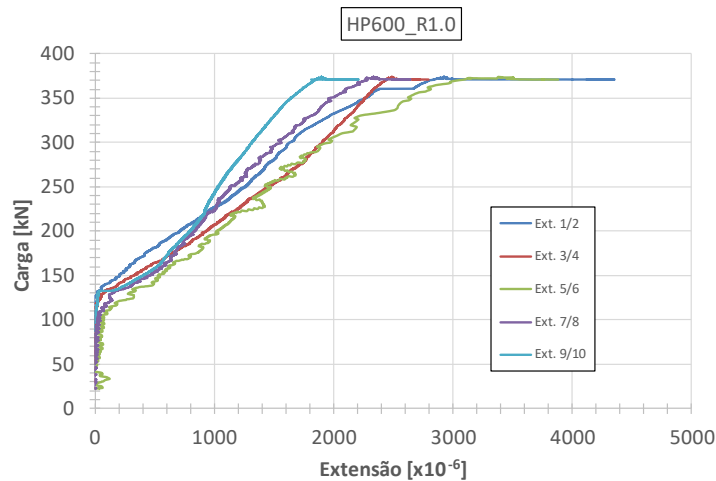


Figura 61 - Evolução da extensão na armadura superior do HP600_R1.0

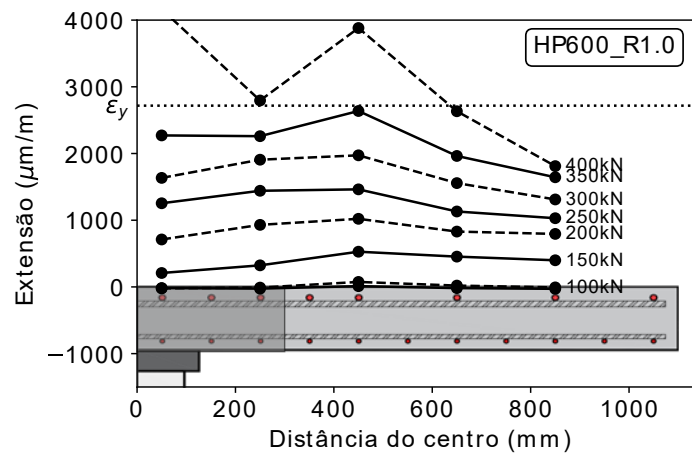


Figura 62 - Distribuição transversal das extensões da armadura longitudinal superior do modelo H600_R1.0

Para este modelo, a fase de fendilhação ocorre do mesmo modo que nos modelos anteriormente analisados. Observa-se uma fase de elevada rigidez, correspondente ao início do carregamento, onde a inclinação do gráfico é bastante acentuada, diminuindo para uma carga vertical aplicada de aproximadamente 100 kN, a partir da qual começam a surgir fendas. Para o carregamento até à rotura, as extensões das armaduras longitudinais variam de forma aproximadamente linear com a carga aplicada, até valores na ordem dos 370 kN. Para valores acima de 370 kN, os varões apresentam um comportamento evidente de entrada em cedência, caracterizado por um acréscimo elevado da extensão para pequenos incrementos de carga.

A distribuição transversal de extensões na armadura longitudinal superior deste modelo traduz um comportamento atípico, dado que as extensões nos varões mais próximos do centro do modelo não são os de maior valor, como seria de esperar.

4.5.5. Modelo HP960_R1.0

As Figuras 63 e 64 apresentam os resultados da evolução e os diagramas com a distribuição transversal das extensões da armadura longitudinal, respetivamente, para o modelo HP600_R1.0.

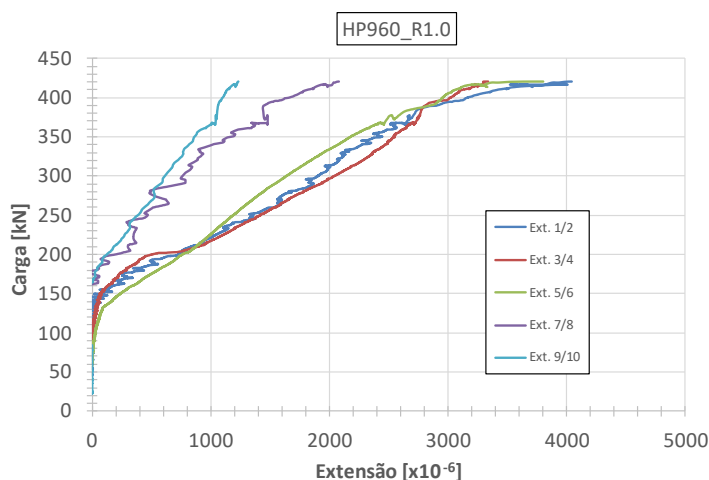


Figura 63 - Evolução da extensão na armadura superior do HP960_R1.0

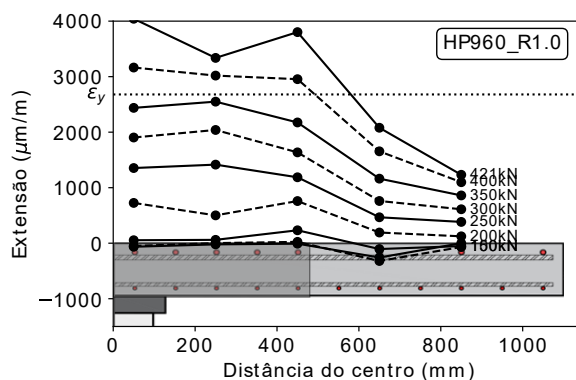


Figura 64 - Distribuição transversal das extensões da armadura longitudinal superior do modelo H960_R1.0

Neste modelo e, do mesmo modo que nos primeiros modelos analisados, o início da fendilhação ocorre nos varões mais próximos do "pilar", para valores próximos de 130 kN. A partir do carregamento até à rotura, é de realçar que os varões mais afastados do centro do

modelo apresentam, em relação aos varões mais próximos, valores de extensão para um dado valor de carga bastante menores.

A distribuição transversal de extensões na armadura longitudinal deste modelo apresenta valores máximos no varão mais próximo da laje, como seria de esperar e verificado na análise dos primeiros modelos.

4.5.5.1. Considerações Finais

Observando a evolução da extensão nas armaduras superiores dos modelos, o comportamento das extensões tem quatro fases distintas: a primeira é o comportamento em regime elástico e aproximadamente linear; a segunda representa uma fase de transição, em que surgem fendas de flexão e verifica-se uma perda de rigidez; a terceira e quarta onde a resposta é em regime fendilhado, com rigidez constante, caracterizada pela perda de rigidez até à ruptura. Na Tabela 15 apresenta-se as extensões médias registadas na armadura superior para níveis de carga.

Tabela 15 - Extensões médias registadas na armadura longitudinal superior ($\times 10^{-6}$)

Modelo	V (carga) [kN]					
	150	200	250	300	350	400
HP0_R0.6	1264.1	1902.3	-	-	-	-
HP600_R0.6	380.4	967.6	1552.1	1908.8 ⁽¹⁾	-	-
HP960_R0.6	59.0	614.9	1226.5	1709.4	2164.3 ⁽²⁾	-
HP600_R1.0	382.7	857.4	1266.5	1677.0	2156.3	-
HP960_R1.0	130.7	465.0	962.4	1390.1	1839.6	1379.3 ⁽³⁾

⁽¹⁾ não se utilizou para o cálculo da extensão média o par de extensómetros (Ext. 7/8), pois para este nível de carga, o varão apresentava-se em cedência.

⁽²⁾ não se utilizou para o cálculo da extensão média o par de extensómetros (Ext. 1/2 e 7/8), pois para este nível de carga, o varão apresentava-se em cedência.

⁽³⁾ não se utilizou para o cálculo da extensão média o par de extensómetros (Ext. 1/2, 3/4 e 5/6), pois para este nível de carga, o varão apresentava-se em cedência.

Observando a Tabela 15, constata-se que existiu uma diminuição das extensões médias das armaduras longitudinais ao longo dos modelos, para um determinado patamar de carga, sendo o modelo de referência o que apresenta os maiores valores de extensão. Como seria de esperar, e comparando os modelos HP600_R0.6 e o HP600_R1.0, uma menor percentagem de armadura longitudinal traduz numa maior extensão média das armaduras. O mesmo observa-se para os modelos HP960_R0.6 e HP960_R1.0, para quase todos os valores de carga apresentados. O aumento da geometria do BEDRF reflete uma diminuição mais acentuada do que aquela verificada no aumento da percentagem de armadura longitudinal, como se observa entre os modelos HP600_R0.6 e HP960_R0.6 e entre os modelos HP600_R1.0 e HP960_R1.0.

4.6. Influência do BEDRF na Capacidade de Carga

Nesta secção é apresentada e analisada a influência do BEDRF na capacidade de carga dos modelos de laje, com base nos resultados experimentais.

O gráfico da Figura 65 apresenta a carga de rotura experimental dos modelos de laje, tanto para o modelo de referência como para os modelos com utilização racional de BEDRF.

A Tabela 16 apresenta a relação entre os valores experimentais de cada modelo com o valor experimental do modelo de referência.

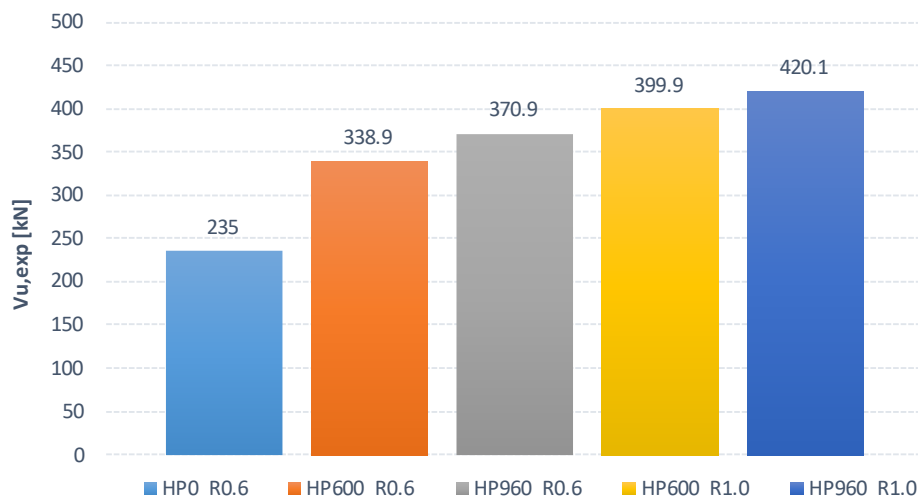


Figura 65 - Cargas de rotura dos modelos de laje

Tabela 16 - Relação entre os valores de rotura experimentais de cada modelo com o modelo de referência

Modelo	V_{exp} [kN]	$V_{exp}/V_{exp,ref}$
HPO_R0.6	235.0	1.00
HP600_R0.6	338.9	1.44
HP960_R0.6	370.9	1.58
HP600_R1.0	399.9	1.70
HP960_R1.0	420.1	1.79

Observando a Figura 65, constata-se que a utilização racional de BEDRF na zona de ligação laje-pilar traduziu-se num aumento bastante significativo da capacidade resistente ao punçoamento dos modelos de laje produzidos, onde o incremento da capacidade de carga é igual e superior a 44%, em relação ao modelo de referência, produzido em betão normal.

Comparando os modelos com igual percentagem de armadura longitudinal (0.6%) e diferente geometria de BEDRF, HP600_R0.6 e HP960_R1.0, verifica-se um incremento na capacidade de carga de 9.5%, superior ao verificado entre os modelos HP600_R1.0 e HP960_R1.0, com um valor de 5.1%.

O incremento na capacidade de carga entre os modelos HP600_R0.6 e HP600_R1.0 foi de cerca de 18.0%, enquanto entre os modelos HP960_R0.6 e HP960_R1.0 foi de cerca de 13.3%.

4.7. Análise do Efeito do Betão com fibras na Capacidade de Carga

4.7.1. Eurocódigo 2 - NP EN 1992-1-1

O valor da resistência ao punçoamento (V_{Rm}) sem armaduras específicas, e para um perímetro de controlo, u , localizado na zona de betão convencional, apresentado na Tabela 17 é determinado utilizando a equação (2.14).

Tabela 17 - Capacidade de carga dos modelos ensaiados para um perímetro localizado na zona de betão convencional

Modelo	$f_{cm}^{(2)}$ [MPa]	$\rho_l^{(3)}$	d [m] ⁽⁴⁾	u [m] ⁽⁵⁾	V_{Rm} [kN] ⁽⁶⁾
HP0_R0.6	24.4	0.0070	177.7	2.48	270.9
HP600_R0.6	27.5	0.0058	118.4	3.89	417.8
HP960_R0.6	26	0.0063	118.0	5.32	574.8
HP600_R1.0	24.6	0.0088	117.5	3.88	457.8
HP960_R1.0	25.5	0.0069	117.9	5.32	587.4

O valor da resistência ao punçoamento (V_{Rm}) sem armaduras específicas, e para um perímetro de controlo, u , localizado na zona de BEDRF, apresentado na Tabela 18 é determinado utilizando a equação (2.14).

Tabela 18 - Capacidade de carga dos modelos ensaiados para um perímetro localizado na zona de BEDRF

Modelo	f_{cm} [MPa]	ρ_l	d [m]	u [m] ⁽⁵⁾	V_{Rm} [kN]
HP600_R0.6	126.1	0.0070	118.4	2.48	471.2
HP960_R0.6	127.7	0.0070	118.0		471.6
HP600_R1.0	123.9	0.0101	117.5		523.5
HP960_R1.0	118.1	0.0100	117.9		517.0

O valor da resistência ao punçoamento (V_{Rm}) condicionante para cada modelo é apresentado na Tabela 19.

Tabela 19 - Valor da resistência ao punçoamento (V_{Rm}) limitante para cada modelo

Modelo	V_{exp} [kN]	V_{Rm} [kN]	V_{exp}/V_{Rm}
HP0_R0.6	235.0	270.9	0.87
HP600_R0.6	338.9	417.8	0.81
HP960_R0.6	370.9	471.6	0.79
HP600_R1.0	399.9	457.8	0.87
HP960_R1.0	420.1	517.0	0.81

4.7.2. Maya et al. e Muttoni et al. - 2012

A capacidade resistente à flexão de uma laje, V_{flex} , pode ser calculada pela equação (4.1) [17]:

$$V_{flex} \approx 8 \cdot \frac{B}{2 \cdot (b_{q1} + b_{q2})} \cdot m_R \quad (4.1)$$

em que:

- B é a largura total do modelo de laje;
- b_{q1} e b_{q2} são as distâncias na direção x desde a face do pilar até aos apoios (Figura 18);
- m_R é o valor médio do momento fletor resistente por unidade de comprimento;

Para o cálculo da resistência à flexão da laje (V_{flex}), é necessário conhecer o momento resistente por unidade de comprimento ($m_{R,BEDRF}$), que pode ser calculado através da equação (4.2) [9]:

$$m_{R,BEDRF} = \rho \cdot d^2 \cdot f_y \cdot \left[1 - \frac{\beta_1 \cdot \left(\rho \cdot f_y + \frac{f_{ct2,f} \cdot h}{d} \right)}{2 \cdot (\alpha_{cc} \cdot f_{cm} + f_{ct2,f})} \right] + \frac{h^2 \cdot f_{ct2,f}}{2} \cdot \left[1 - \frac{\rho \cdot f_y \cdot \frac{d}{h} + f_{ct2,f}}{(\alpha_{cc} \cdot f_{cm} + f_{ct2,f})} \right] \cdot \left[1 + \frac{\rho \cdot f_y \cdot \frac{d}{h} + f_{ct2,f}}{(\alpha_{cc} \cdot f_{cm} + f_{ct2,f})} \cdot (1 - \beta_1) \right] \quad (4.2)$$

em que:

- β_1 é um fator relativo à profundidade da zona comprimida, que é aproximado a $\beta_1 = 0.80 - (f_{cm} - 50)/400$;

- O fator α_{cc} é um fator que tem em conta os efeitos de longo prazo sobre a resistência à compressão e também os efeitos desfavoráveis devido às condições de carga;
- O parâmetro $f_{ct2,f}$ é a tensão de tração residual do BEDRF para uma abertura de fenda de 3.0 mm;

O valor médio do momento fletor resistente por unidade de comprimento do betão convencional sem fibras pode ser calculado pela equação (4.3) [23]:

$$m_{R,BN} = f_y \cdot \rho \cdot d^2 \cdot \left(1 - \frac{\beta_1 \cdot f_y \cdot \rho}{2 \cdot f_{cm}} \right) \quad (4.3)$$

O valor médio do momento fletor resistente por unidade de comprimento, m_R , pode ser calculado pela equação (4.4) [23]:

$$m_R = \frac{m_{R,BEDRF} \cdot c_{BEDRF} + m_{R,BN} \cdot (B - c_{BEDRF})}{B} \quad (4.4)$$

em que:

- c_{BEDRF} é a largura da região com BEDRF;

Como é possível observar na Figura 15, o rácio de armadura longitudinal é diferente na zona de betão normal e na zona de BEDRF. Para tal, é necessário calcular a percentagem geométrica de armadura, conforme a equação (4.5):

$$\rho = n^{\circ}varões \cdot \frac{\frac{\pi \cdot D^2}{4}}{l \cdot d} \quad (4.5)$$

em que:

- $n^{\circ}varões$ é o número de varões presentes na zona de betão normal ou na zona de BEDRF;
- D é o diâmetro dos varões utilizados;
- l é a largura da zona de betão normal ou da zona de BEDRF onde estão distribuídos os varões em questão;
- d é a altura útil da laje;

A Tabela 20 apresenta o processo de cálculo para a obtenção dos valores da capacidade resistente à flexão.

Tabela 20 - Capacidade resistente à flexão dos modelos de laje

Modelo	ρ_{BN}	ρ_{BEDRF}	d [mm]	f_y [MPa]	β_1	$f_{ct2,f}$	h [mm]	α_{cc}	$f_{cm,BN}$ [MPa]	$f_{cm,BEDRF}$ [MPa]
HPO_R0.6	0.0057	0	117.7	547	0.86	1.83	150	1	24.4	0
HP600_R0.6	0.0048	0.008	118.4	547	0.61	1.83	150	1	27.5	126.1
HP960_R0.6	0.0046	0.007	118.0	547	0.61	1.83	150	1	26	127.7
HP600_R1.0	0.006	0.0096	117.5	547	0.62	1.83	150	1	24.6	123.9
HP960_R1.0	0.0046	0.010	117.9	547	0.63	1.83	150	1	25.5	118.1

A Tabela 21 apresenta o valor do momento resistente por unidade de comprimento para o BEDRF ($m_{R,BEDRF}$), calculado segundo a equação (4.2); o valor do momento resistente por unidade de comprimento para o betão normal ($m_{R,BN}$), calculado segundo a equação (4.3); o valor médio do momento fletor por unidade de comprimento (m_R), calculado segundo a equação (4.4); o valor da capacidade resistente à flexão (V_{flex}), calculado segundo a equação (4.1).

Tabela 21 - Capacidade resistente à flexão dos modelos de laje de acordo com [9], [17] e [23]

Modelo	$m_{R,BEDRF}$ [N/mm ²]	$m_{R,BN}$ [N/mm ²]	m_R [N/mm ²]	V_{flex} [kN]
HPO_R0.6	0	40750.8	40750.8	308.7
HP600_R0.6	79297.4	35421.7	47387.8	359.0
HP960_R0.6	72038.9	34261.8	50746.3	384.5
HP600_R1.0	90806.7	43734.1	56572.1	428.6
HP960_R1.0	93553.1	34199.2	60099.1	455.3

Nas Figuras 66 a 70 são apresentados os resultados de acordo com as formulações propostas por Maya et al. [9] e Muttoni [10], nomeadamente a linha de critério de rotura, segundo a equação (2.8) e a curva carga rotação, segundo a equação (2.9). Os valores de colapso (V) previstos resultam da interseção destas duas curvas

A linha de critério de rotura para uma rotura fora da zona de BEDRF é descrita utilizando um perímetro de controlo de $0.5d$ a partir da zona de BEDRF.

Para uma rotura dentro da zona de BEDRF, a linha de critério de rotura é descrita utilizando tanto a contribuição do BEDRF como a contribuição das fibras, onde se procedeu à separação da contribuição de cada tipo de fibra. Para tal, apresenta-se duas linhas de critério de rotura, uma fora do BEDRF e outra dentro do BEDRF.

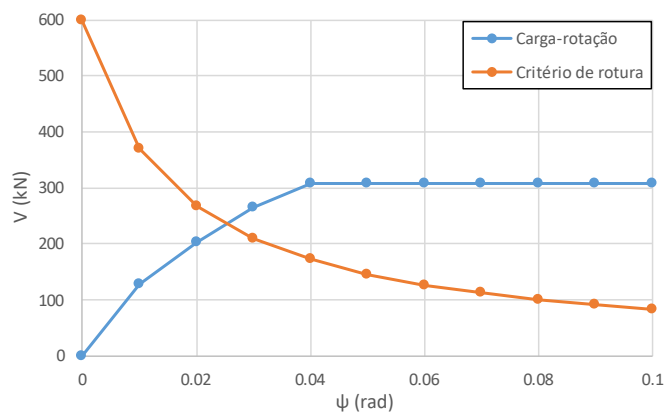


Figura 66 - Curva $V - \psi$ para o modelo HP0_R0.6

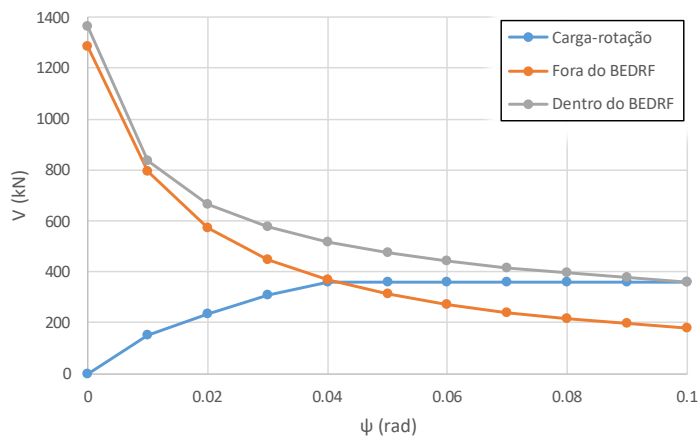


Figura 67 - Curva $V - \psi$ para o modelo HP600_R0.6

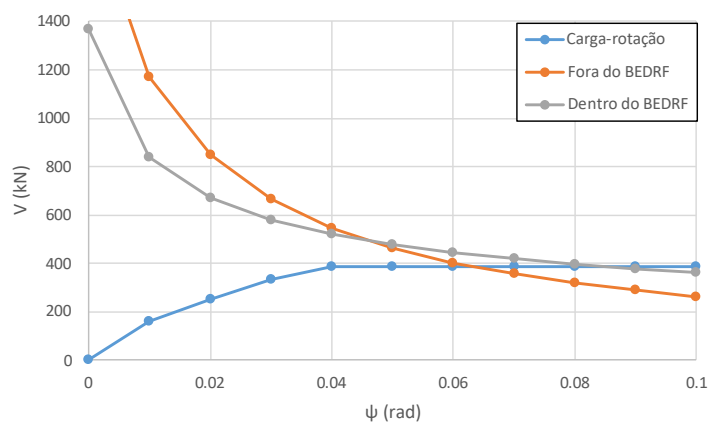


Figura 68 - Curva $V - \psi$ para o modelo HP960_R0.6

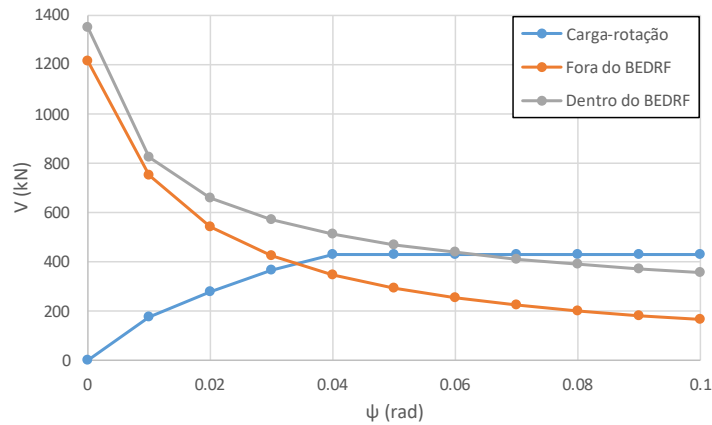


Figura 69 - Curva $V - \psi$ para o modelo HP600_R1.0

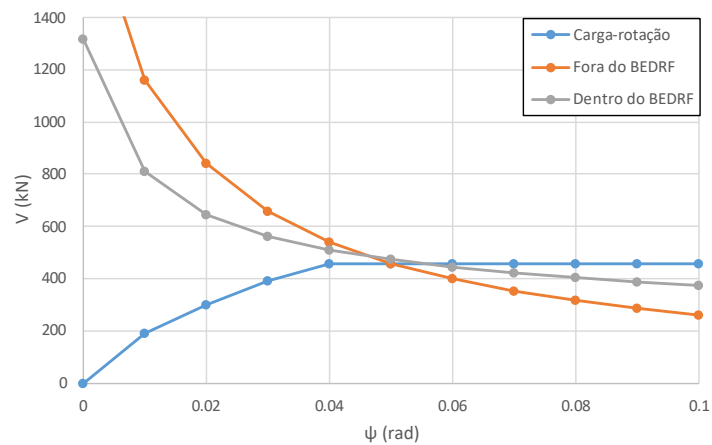


Figura 70 - Curva $V - \psi$ para o modelo HP960_R1.0

Analisando as Figuras 66 a 70, verifica-se que só ocorre interseção das duas curvas previamente ao limite da resistência à flexão, V_{flex} , para o modelo HP0_R0.6 e HP600_R0.6. Ambas para a curva que representa a zona fora do BEDRF.

De notar que a resistência inicial na zona dentro do BEDRF é menor que resistência inicial na zona fora do BEDRF para os modelos que detêm a maior largura de BEDRF, isto é, os modelos HP960_R0.6 e HP960_R1.0.

A Tabela 22 apresenta uma comparação das cargas de rotura experimentais com os valores dos esforços resistentes previstos recorrendo ao método previsto por Maya et al [9] e Muttoni [10].

Tabela 22 - Comparação das cargas de rotura experimentais com as previstas

Modelo	$V_{u,exp}$ [kN]	V_{flex} [kN]	$\psi_{u,calc}$	$V_{u,calc}$ [kN]	$V_{u,exp}/V_{u,calc}$
HPO_R0.6	235.0	308.7	0.0248	235.0	1.00
HP600_R0.6	338.9	359.0	0.0375	359.0	0.94
HP960_R0.6	370.9	384.5	0.0375	384.5	0.96
HP600_R1.0	399.9	428.6	0.0333	396.0	1.01
HP960_R1.0	420.1	455.3	0.0375	455.3	0.92

Analisando a Tabela 22, verifica-se que os valores previstos utilizando o método concessionado por Maya et al. [9] e Muttoni [10], aproximam-se bastante dos valores de carga de rotura experimental obtidos nos ensaios.

5.1. Introdução

Neste trabalho foi apresentado um estudo do comportamento ao punçoamento de lajes fungiformes com utilização racional de um betão de elevado desempenho reforçado com fibras de aço. Para tal foram dimensionados e ensaiados 5 modelos de laje, que permitiram avaliar diversos parâmetros, como: os deslocamentos verticais, as extensões na armadura longitudinal superior e a capacidade de carga.

O presente capítulo resume os principais resultados obtidos nos ensaios experimentais com as respetivas conclusões.

5.2. Deslocamentos Verticais

Verificou-se que os modelos de BEDRF alcançaram maiores deformações na rotura em relação ao modelo de referência, HP0_R0.6.

A transição do modelo HP600_R0.6 para o modelo HP960_R0.6 traduz um crescimento menos acentuado na capacidade de carga e na rigidez, comparando com a transição do modelo HP600_R0.6 para o modelo HP600_R1.0. Consta-se que o aumento da percentagem de armadura longitudinal é mais influenciador no aumento da capacidade de carga e da rigidez dos modelos do que o aumento da geometria do BEDRF.

Verificou-se que os modelos HP600_R1.0 e HP960_R1.0 apresentaram um comportamento mais rígido, quando comparados com os restantes modelos, apresentando também maiores deslocamentos na rotura.

5.3. Extensões na Armadura Longitudinal Superior

Constata-se que existe um decréscimo parcial das extensões médias das armaduras ao longo dos modelos (desde HP0_R0.6 até HP960_R1.0), para um determinado patamar de carga, pois as suas características são melhoradas, tanto no aumento da percentagem de armadura longitudinal como no aumento da geometria do BEDRF. Apesar do decréscimo das extensões médias de modelo para modelo, ocorre uma exceção entre os modelos HP960_R0.6 e HP600_R1.0, onde se observa que o aumento da geometria do BEDRF influencia mais no decréscimo das extensões médias nas armaduras do que o aumento da percentagem de armadura longitudinal.

Verifica-se que o modelo de referência (HP0_R0.6) apresenta uma extensão média de 100% das extensões dos outros modelos, para a mesma carga aplicada.

Comparando as diferenças das extensões médias dos modelos HP600_R0.6 e HP600_R1.0 com as diferenças dos modelos HP960_R0.6 e HP960_R1.0, verifica-se que o decréscimo das extensões médias nas armaduras acentuou-se mais nos dois últimos modelos (com maior geometria de BEDRF). A mesma situação acontece comparando a diferença das extensões médias dos modelos HP600_R0.6 e HP960_R0.6 com a dos modelos HP600_R1.0 e HP960_R1.0, onde se verifica um maior decréscimo das extensões médias nos últimos dois modelos.

5.4. Influência do BEDRF na Capacidade de Carga

Verificou-se um aumento máximo da capacidade de carga ao punçoamento de 44%, para o modelo HP600_R0.6, em relação ao modelo de referência.

Comparando os valores obtidos para os modelos HP600_R0.6 e HP960_R0.6, onde se altera o parâmetro da geometria do BEDRF, verifica-se um aumento de 9.4% na capacidade de carga. Comparando os valores obtidos para os modelos HP600_R1.0 e HP960_R1.0, verifica-se um aumento de 5.1% na capacidade de carga. O aumento da geometria do BEDRF influencia mais na capacidade de carga para os modelos com 0.6% de percentagem de armadura longitudinal.

Ao comparar os valores obtidos para os modelos HP600_R0.6 e HP600_R1.0, onde se altera a percentagem de armadura longitudinal, verifica-se um aumento de 18% na capacidade de carga. Comparando os valores obtidos para os modelos HP960_R0.6 e HP960_R1.0, verifica-se um aumento de 13.3% na capacidade de carga. Constata-se que o aumento da percentagem de armadura longitudinal influencia mais na capacidade de carga para os modelos com 600 mm de geometria de BEDRF.

1. Swamy, R. N., Ali S. A. R.: "Punching Shear Behavior of Reinforced Slab-Column Connections Made with Steel Fiber Concrete". *ACI Journal*, Vol. 79:pp. 392-406. 1982.
2. Narayanan R., Darwish I. Y. S.: "Punching shear tests on steel-fibre-reinforced micro-concrete slabs". *Magazine of Concrete Research*, Vol. 39 (No.138):pp. 42-50. 1987.
3. Marzouk H. Hesham. Hussein A.: "Experimental Investigation on the Behaviour of High-Strength Concrete Slabs". *ACI Structural Journal*. 1991
4. Chanthabouala K, Teng S, Chandra J, Tan KH, Ostertag CP.: "Punching tests of double-hooked-end fiber-reinforced concrete slabs". *ACI Structural Journal*. 2018.
5. Ozden S, Ersoy U, Ozturan T.: "Punching shear tests of normal- and high-strength concrete flat plates". *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2006 Nov;33(11):1389–400.
6. Gouveia ND, Fernandes NAG, Faria DMV, Ramos AMP, Lúcio VJG.: "SFRC flat slabs punching behaviour - Experimental research". *Composites Part B: Engineering*. 2014.
7. Inácio MMG, Almeida AFO, Faria DMV, Lúcio VJG, Ramos AP.: "Punching of high strength concrete flat slabs without shear reinforcement. *Engineering Structures*". 2015.
8. Inácio MMG, Lapi M, Pinho Ramos A.: "Punching of reinforced concrete flat slabs – Rational use of high strength concrete". *Engineering Structures*. 2020.
9. Maya L., Ruiz M., Muttoni A., Foster S. J.: "Punching shear strength of steel fibre reinforced concrete slabs. *Engineering Structures*. 2012.
10. Muttoni A.: "Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement. *ACI Structural Journal*, Vol. 105. 2008.
11. Muttoni A., Fernandez M.: "The critical shear crack theory as a mechanical model for punching shear design and its application to code provisions. In: *FIB Bulletin 57: shear and punching shear in RC and FRC elements*. Lausanne (Switzerland), 2010.
12. Fédération International du Béton, fib Model Code for Concrete Structures 2010. Ernst e Sohn, 2013.
13. Voo L., Foster J.: "Tensile fracture of fibre reinforced concrete: variable engagement mode. 6th Rilem symposium of fibre reinforced concrete (FRC). 2004.
14. Instituto Português da Qualidade: "NP EN 1992-1-1 Eurocódigo 2: Projeto de Estruturas de betão - Parte 1-1: "Regras gerais e regras para edifícios". 2010.
15. Nunes S., Pimentel M., Sousa C.: "Mechanical and Fracture Behaviour of an HPFRC. In: Serna P., Llano-Torre A., Martí-Vargas J.R., Navarro-Gregori J. (eds) *Fibre Reinforced Concrete: Improvements and Innovations II*. BEFIB 2021. RILEM Bookseries, vol 36. Springer, Cham. 2022.

16. Blazy J., Nunes S., Sousa C., Pimentel M.: "Development of and HPFRC for Use In Flat Slabs" in Fibre Reinforced Concrete: Improvements and Innovations. BEFIB 2020 - Proceedings of and International Conference, Valencia, September 2020. 2021.
17. Dinarte N.: "Comportamento ao Punçamento de Lajes Fungiformes em BRF Sujeitas a Ações Monotónicas e Cíclicas", Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Tese de Doutoramento, 2017.
18. Lofgren I.: "Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction-a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis". Tese de Doutoramento, Chalmers University of Technology. 2005.
19. Bruhwiler E., Wittmann H.: "The wedge splitting test, a new method for performing stable fracture mechanics test". Eng. Fracture Mech. 35 (1-3). 1990.
20. Fernandes N.: "Caracterização do Betão Reforçado com Fibras de Aço", Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2012.
21. Kooiman, A.G.: "Modelling Steel Fibre Reinforced Concrete for Structural Design", Tese de Doutoramento, Technische Universiteit Delft, Roterdão, Holanda, 2000.
22. Koppitz R., Kenel A., Keller T.: "Effect of load history on punching shear resistance of flat slabs. Eng Struct 2015;90:130-42. 2015.
23. Gouveia N., Faria D., Ramos A.: "Assessment of SFRC flat slab punching behaviour - part I: monotonic vertical loading. Mag Concr Res. 2018.

Dinarte N.: "Comportamento ao Punçamento de Lajes Fungiformes em BRF Sujeitas a Ações Monotónicas e Cíclicas", Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Tese de Doutoramento, 2017. 9

Nunes S., Pimentel M., Sousa C.: "Mechanical and Fracture Behaviour of an HPFRC. In: Serna P., Llano-Torre A., Martí-Vargas J.R., Navarro-Gregori J. (eds) Fibre Reinforced Concrete: Improvements and Innovations II. BEFIB 2021. RILEM Bookseries, vol 36. Springer, Cham. 2022.

Koppitz R., Kenel A., Keller T.: "Effect of load history on punching shear resistance of flat slabs. Eng Struct 2015;90:130-42. 2015.

Gouveia N., Faria D., Ramos A.: "Assessment of SFRC flat slab punching behaviour - part I: monotonic vertical loading. Mag Concr Res. 2018.

Lofgren I.: "Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction-a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis". Tese de Doutoramento, Chalmers University of Technology. 2005.



2022

JOÃO PEDRO DE MATOS RELVAS

UTILIZAÇÃO RACIONAL DE BETÕES DE ALTA
RESISTÊNCIA REFORÇADOS COM FIBRAS DE AÇO EM LAJES
FUNGIFORMES