

# **Punçamento em Lajes de Betão de Elevada Resistência Sujeitas a Ações Horizontais Cíclicas**

**Micael Inácio**

**André Almeida**

**António Pinho Ramos**

## **RELATÓRIO 4**

HiCon - Uso Racional de Betão de Elevada Resistência em Estruturas de Laje Fungiforme Sujeitas a Ações Cíclicas e Sísmicas

(EXPL/EC M-EST/1371/2013)

Outubro de 2015



## ÍNDICE DE MATÉRIAS

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. DESCRIÇÃO DOS MODELOS.....</b>	<b>1</b>
<b>3. MATERIAIS.....</b>	<b>9</b>
<b>4. INSTRUMENTAÇÃO.....</b>	<b>10</b>
<b>5. PROTOCOLO DE ENSAIO.....</b>	<b>12</b>
<b>6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>13</b>
6.1. DESLOCAMENTOS VERTICAIS .....	13
6.2. EXTENSÃO NAS ARMADURAS LONGITUDINAIS .....	18
6.3. COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO.....	22
6.4. DIAGRAMA HISTERÉTICO .....	25
<b>7. CONCLUSÃO .....</b>	<b>27</b>
<b>8. AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>28</b>
<b>9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>28</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Geometria em plana e em alçado dos modelos ensaiados ao punçoamento cíclico (dimensões em mm). .....	2
Figura 2 – Geometria da zona em BER nos modelos sujeitos ao punçoamento cíclico. ....	3
Figura 3 – Armaduras longitudinais dos modelos ensaiados ao punçoamento cíclico (dimensões em mm). ....	4
Figura 4 – Fotos da betonagem do modelo SHSC1.....	5
Figura 5 – Fotos da betonagem do modelo CSHC2. ....	5
Figura 6 – Sistema de aplicação das cargas verticais e da ação horizontal (adaptado de Almeida <i>et al</i> []). ...	6
Figura 7 – Sistema de compatibilização das rotações e momentos fletores: a) indeformado; b) carga gravítica e c) ação horizontal (adaptado de Almeida <i>et al</i> []). .....	7
Figura 8 - Sistema de compatibilização dos deslocamentos verticais e esforço transverso: a) indeformado; b) carga gravítica e c) ação horizontal (adaptado de Almeida <i>et al</i> []) .....	8
Figura 9 – Vista geral do sistema de ensaio.....	9
Figura 10 – Planta com pontos de aplicação das forças verticais e distribuição dos defletómetros. ....	10
Figura 11 – Posição dos extensómetros usados na armadura superior. ....	11
Figura 12 – Equipamento de monitorização e de aquisição de dados. ....	11
Figura 13 – Vista geral do equipamento do modelo e equipamento de monitorização.....	12
Figura 14 – Protocolo de aplicação da ação horizontal cíclica. ....	13
Figura 15 - Modelo C-50: perfis longitudinais para os primeiros e terceiros ciclos dos diferentes níveis de <i>drift</i> – efeito isolado da carga horizontal no topo do pilar. ....	14
Figura 16 – Modelo C-50: perfis longitudinais para os primeiros e terceiros ciclos dos diferentes níveis de <i>drift</i> – efeito total. ....	14
Figura 17- Modelo CHSC1: perfis longitudinais para os primeiros e terceiros ciclos dos diferentes níveis de <i>drift</i> – efeito isolado da carga horizontal no topo do pilar. ....	15
Figura 18 - – Modelo CHSC1: perfis longitudinais para os primeiros e terceiros ciclos dos diferentes níveis de <i>drift</i> – efeito total.....	15
Figura 19 - Modelo CHSC2: perfis longitudinais para os primeiros e terceiros ciclos dos diferentes níveis de <i>drift</i> – efeito isolado da carga horizontal no topo do pilar. ....	16
Figura 20 – Modelo CHSC2: perfis longitudinais para os primeiros e terceiros ciclos dos diferentes níveis de <i>drift</i> – efeito total. ....	16
Figura 21 - Modelo CHSC3: perfis longitudinais para os primeiros e terceiros ciclos dos diferentes níveis de <i>drift</i> – efeito isolado da carga horizontal no topo do pilar. ....	17
Figura 22 - Modelo CHSC3: perfis longitudinais para os primeiros e terceiros ciclos dos diferentes níveis de <i>drift</i> – efeito total. ....	17
Figura 23 – Modelo C-50 - Extensões na armadura longitudinal superior para diferentes <i>drifts</i> : (a) sentido N-S e (b) sentido S-N.....	18

Figura 24 - Modelo CHSC 1 - Extensões na armadura longitudinal superior para diferentes <i>drifts</i> : (a) sentido N-S e (b) sentido S-N. ....	19
Figura 25 - Modelo CHSC 2 - Extensões na armadura longitudinal superior para diferentes <i>drifts</i> : (a) sentido N-S e (b) sentido S-N. ....	20
Figura 26 – Distribuição da fendilhação de flexão na face superior do modelo SHSC3 após a aplicação do carregamento vertical. ....	21
Figura 27 - Modelo CHSC 3 - Extensões na armadura longitudinal superior para diferentes <i>drifts</i> : (a) sentido N-S e (b) sentido S-N. ....	21
Figura 28 – Diagrama histerético típico para uma ação cíclica [108]. ....	23
Figura 29 – Modelo C50 – Coeficiente de amortecimento viscoso para cada ciclo completo. ....	23
Figura 30 – Modelo CHSC 1 – Coeficiente de amortecimento viscoso para cada ciclo completo. ....	24
Figura 31 – Modelo CHSC 2 – Coeficiente de amortecimento viscoso para cada ciclo completo. ....	24
Figura 32 – Modelo CHSC 3 – Coeficiente de amortecimento viscoso para cada ciclo completo. ....	24
Figura 33 – Modelo C-50 – diagrama histerético. ....	25
Figura 35 – Modelo CHSC 1 – diagrama histerético. ....	26
Figura 36 – Modelo CHSC 2 – diagrama histerético. ....	26
Figura 37 – Modelo CHSC 3 – diagrama histerético. ....	27
Figura 38 - Vista superior dos modelos: (a) SHSC2 para 2,5% para S e (b) SHSC3 para 3,0% para N. ....	27

## **ÍNDICE DE QUADROS**

Quadro 1 – Altura útil média e percentagem geométrica dos modelos ensaiados. ....	2
Quadro 2 – Propriedades mecânicas dos betões utilizados nos modelos com carga horizontal (MPa). ....	10
Quadro 3 – Propriedades mecânicas do aço das armaduras longitudinais. ....	10
Quadro 4 – Propriedades mecânicas do aço das armaduras longitudinais. ....	12





## **1. INTRODUÇÃO**

O problema do punçamento nas estruturas em laje fungiforme é mais severo quando existe a ação combinada de carga gravítica e solicitações horizontais cíclicas, como é o caso por exemplo, da ocorrência de um sismo.

Neste relatório são apresentados e analisados os resultados obtidos em ensaios de modelos de laje fungiforme com utilização parcial de BER na zona da ligação pilar-laje. Foram produzidos três modelos com utilização racional de BER e um modelo de referência, totalmente em betão convencional. Todos os modelos foram ensaiados com a aplicação de uma carga vertical constante distribuída de forma uniforme na laje e com o carregamento horizontal cíclico de amplitude crescente.

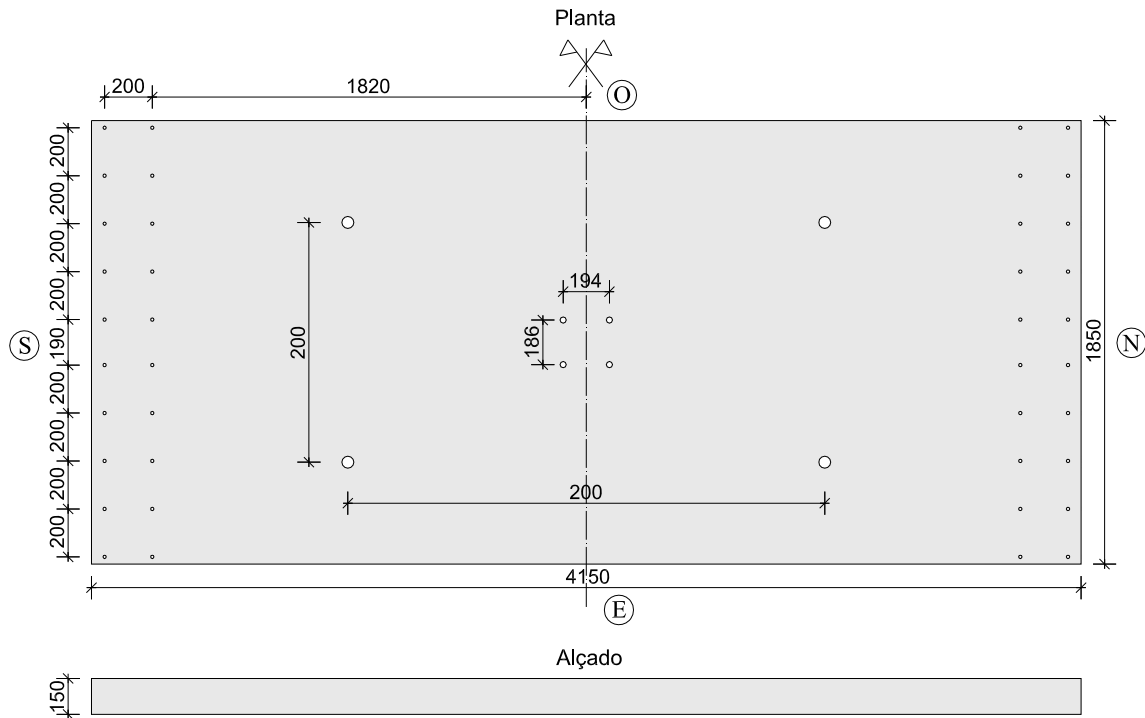
Durante os ensaios foram monitorizados os deslocamentos verticais, o deslocamento horizontal no topo do pilar, a carga gravítica, a força horizontal aplicada no topo do pilar e a extensão de alguns varões da armadura longitudinal superior. Após os ensaios, procedeu-se ao corte longitudinal dos modelos para análise da superfície de rotura.

## **2. DESCRIÇÃO DOS MODELOS**

Os modelos utilizados são retangulares com 4150 mm de comprimento, 1850 mm de largura, 150 mm de espessura e pretendem representar a laje de um edifício de escritórios delimitada na direção longitudinal pelo meio vão e na direção transversal pela linha de momentos nulos. A produção dos modelos foi realizada numa unidade de elementos de betão pré-fabricados.

A ligação pilar-laje foi materializada através de dois troços de pilar metálico devido a condicionantes de produção, transporte e manuseamento dos modelos. A Figura 1 mostra a geometria em planta e em alçado dos modelos produzidos. Foi necessário deixar negativos para fixação dos troços do pilar, sistema de ensaio e passagem de monocordões de pré-esforço.

Foram ensaiados quatro modelos, três dos quais com utilização parcial de BER e um que serve de referência, totalmente em betão normal. Nos modelos híbridos fez-se variar a geometria em planta e espessura da zona em BER, posicionada na área de ligação do pilar à laje, conforme representado na Figura 2.

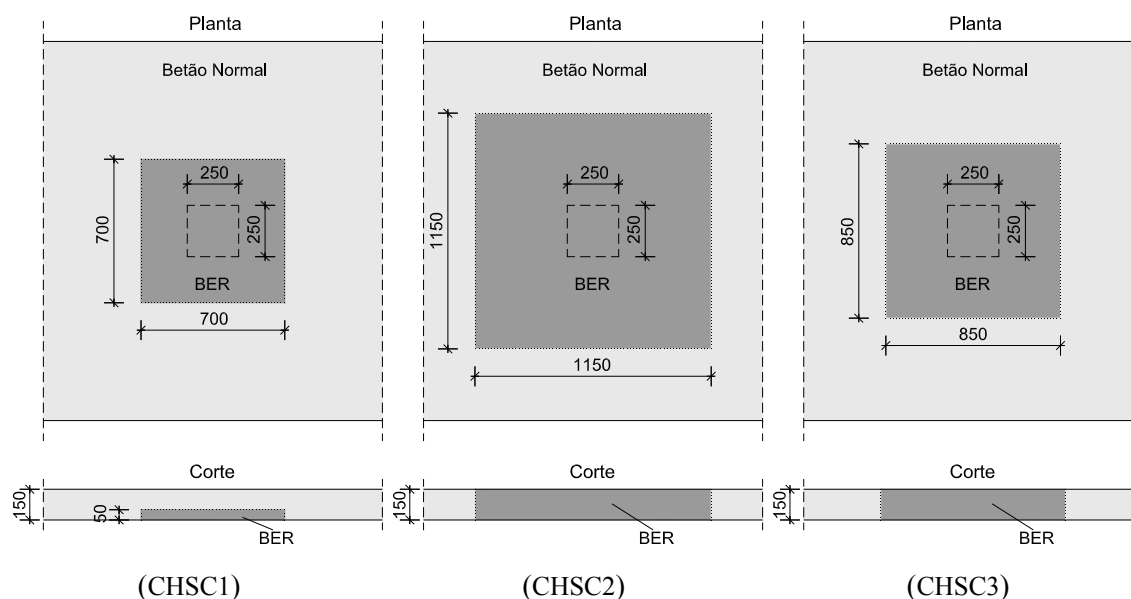


**Figura 1** – Geometria em planta e em alçado dos modelos ensaiados ao punçoamento cíclico (dimensões em mm).

Na Figura 3 estão representadas as armaduras adotadas. O recobrimento das armaduras foi de 20 mm, resultando numa altura útil média de aproximadamente 118 mm e 120 mm, para a armadura superior e inferior, respetivamente. A percentagem de armadura longitudinal superior no apoio é de 0,96%. As armaduras longitudinais superiores e inferiores com maior altura útil foram orientadas na direção N-S. Imediatamente antes da betonagem procedeu-se à medição da altura útil das armaduras superiores no apoio e o seu valor médio é apresentado no Quadro 1, assim como a percentagem geométrica de armadura superior.

**Quadro 1** – Altura útil média e percentagem geométrica dos modelos ensaiados.

Modelo	Geometria da zona em BER (mm)	d (mm)
C-50	-	118,4
CHSC1	700x700x50	118,1
CHSC2	1150x1150x150	117,5
CHSC3	850x850x150	118,4



**Figura 2** – Geometria da zona em BER nos modelos sujeitos ao punçoamento cíclico.

Nos modelos com utilização parcial de BER foi usada uma rede hexagonal galvanizada que serviu de molde ao BER betonado na zona do apoio da laje. Posteriormente procedeu-se à colocação da armadura longitudinal superior e ao levantamento da sua altura útil. Após a betonagem da zona em BER foi aplicado o betão convencional. A compactação dos betões foi realizada através do sistema de vibração acoplado às mesas disponíveis na fábrica.

Após a betonagem as lajes permaneceram nos moldes durante cerca de 12 horas. Durante esse período a zona central dos modelos foi coberta por uma serapilheira humedecida. Após a desmoldagem as lajes foram armazenadas e a serapilheira foi molhada periodicamente durante os primeiros dias. Na Figura 4 e Figura 5 são apresentadas fotografias da fase de produção dos modelos CHSC1 e CHSC2.

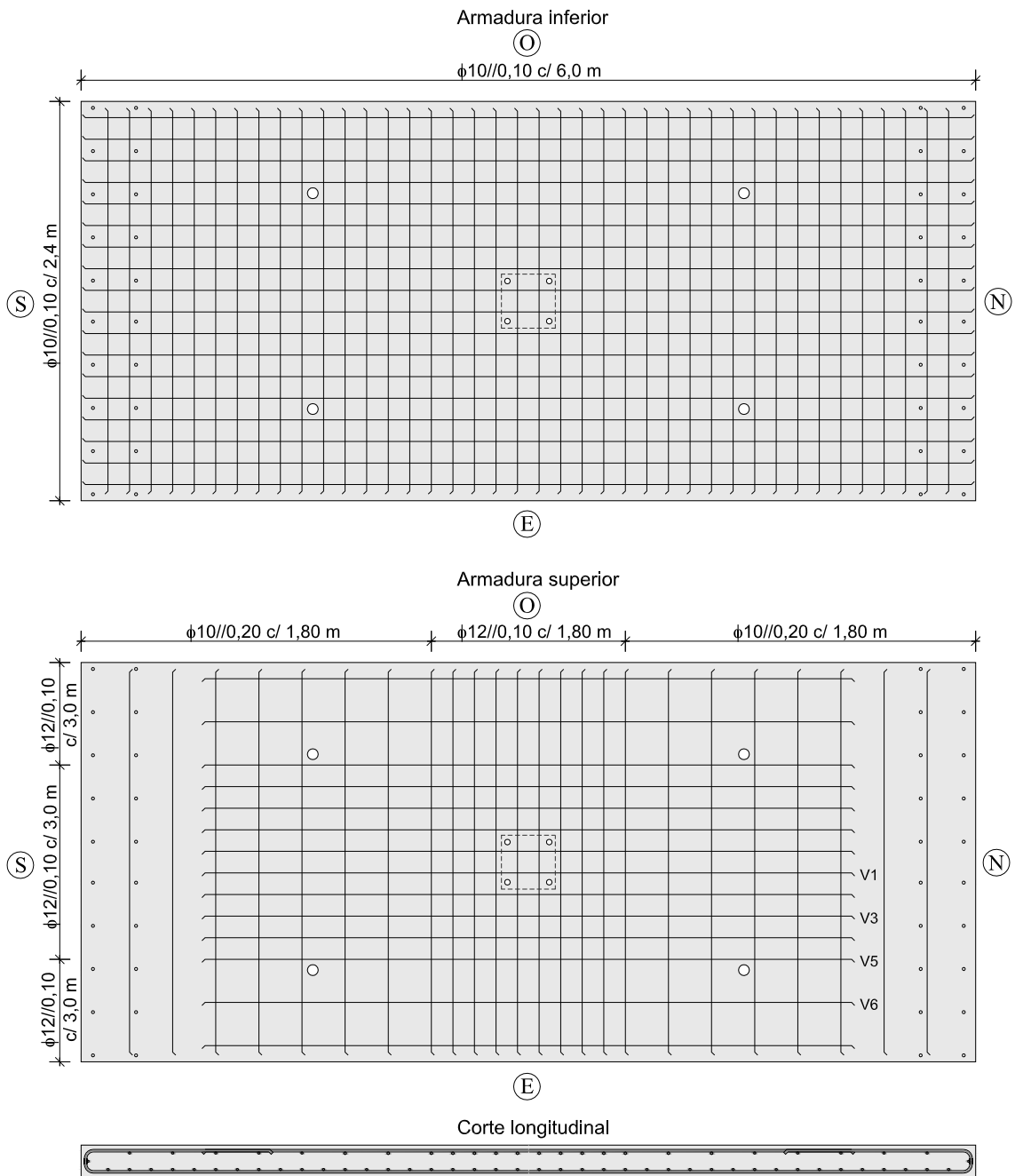


Figura 3 – Armaduras longitudinais dos modelos ensaiados ao punçoamento cíclico (dimensões em mm).



**Figura 4** – Fotos da betonagem do modelo SHSC1.



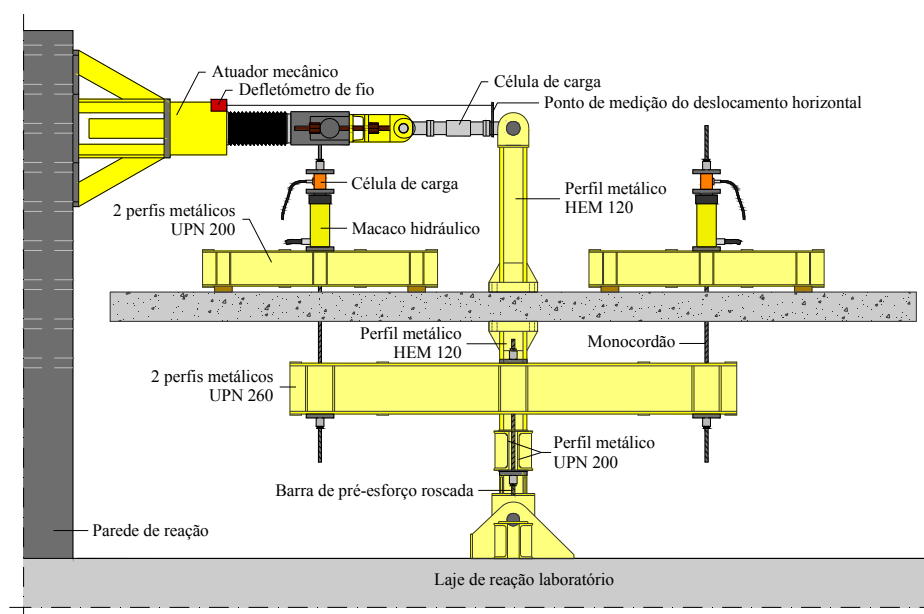
**Figura 5** – Fotos da betonagem do modelo CSHC2.

## 2.1 SISTEMA DE ENSAIO

A maioria dos ensaios experimentais realizados com carregamento vertical e horizontais combinados impuseram condições de fronteira simplificadas, tais como o deslocamento vertical dos bordos impedido e a permissão da rotação livre dos bordos, que não reproduzem o que se verifica na realidade. Nestas condições de ensaio, as linhas de momento nulo devido às cargas verticais e horizontais são coincidentes e mantêm a sua posição fixa, não existe a possibilidade de redistribuição do momento fletor do apoio para o vão e os elementos que impedem o deslocamento vertical dos bordos recebem parte da carga gravítica aplicada aos modelos, condicionando a sua degradação.

Na Universidade Nova de Lisboa, com o objetivo de aproximar o comportamento de uma laje fungiforme inserido numa estrutura real com o do ensaio de modelos simplificados, Almeida *et al* [38] conceberam um sistema de ensaio considerando as condições de fronteira impostas numa estrutura real. Para as cargas gravíticas, nos bordos N e S do modelo (Figura 1), que representam as secções de meio vão com momento fletor máximo positivo, a rotação e o esforço transversal são nulos, com deslocamentos verticais iguais. Para as ações horizontais, os deslocamentos e rotações nos bordos N e S devem ser iguais, os momentos fletores são iguais de sinal contrário e os esforços transversos assumem valor simétrico.

Para a aplicação das cargas gravíticas e garantir que estas se mantiveriam constantes durante o ensaio foi concebido um sistema equilibrado fechado, através do qual as cargas são encaminhadas para o troço inferior do pilar, em detrimento dos sistemas frequentemente utilizados de fixação à laje de reação do laboratório ou de suspensão de elementos pesados (Figura 6).



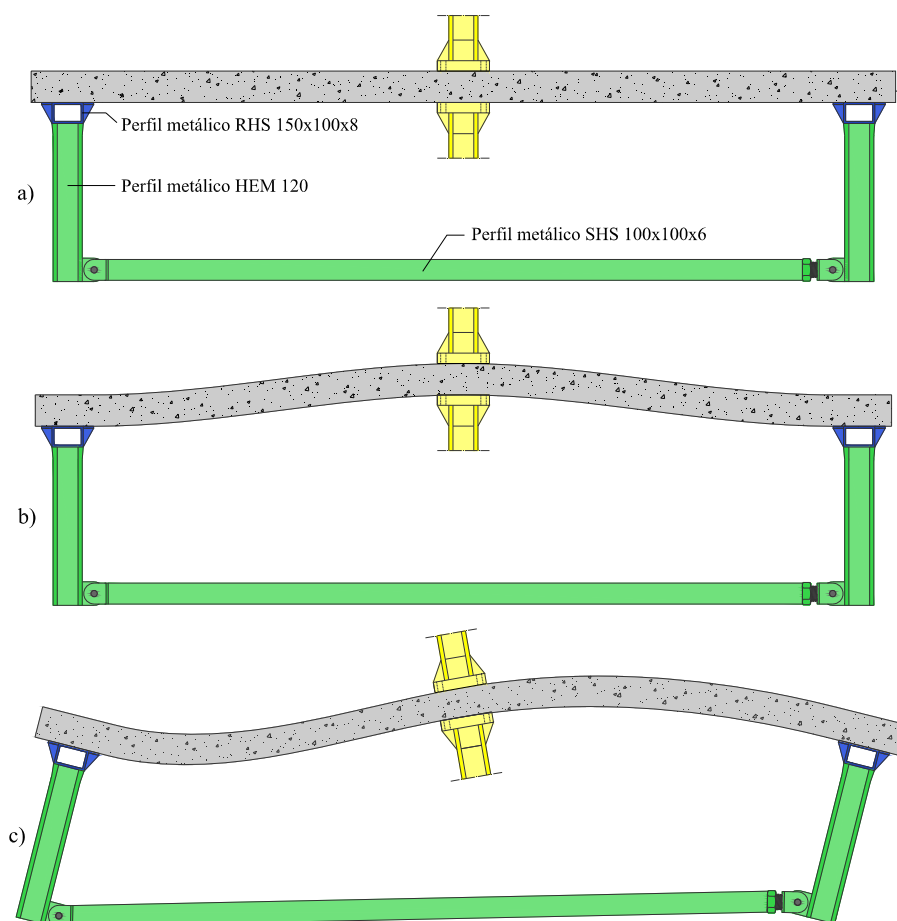
**Figura 6** – Sistema de aplicação das cargas verticais e da ação horizontal (adaptado de Almeida *et al* []).



Foram utilizadas quatro vigas de distribuição, cada uma com dois pontos de aplicação de carga na face superior da laje, sobre as quais foram colocados macacos hidráulicos com 200 kN de capacidade. Os pontos de aplicação de carga vertical constituem uma malha uniformemente espaçada de 1 m.

A utilização de uma unidade de pressão hidráulica configurada na função *Load Maintainer*, ligada em paralelo aos quatro macacos hidráulicos de características iguais, permite manter a carga aproximadamente constante ao longo do ensaio independentemente da rigidez da laje e da força horizontal aplicada no topo do pilar.

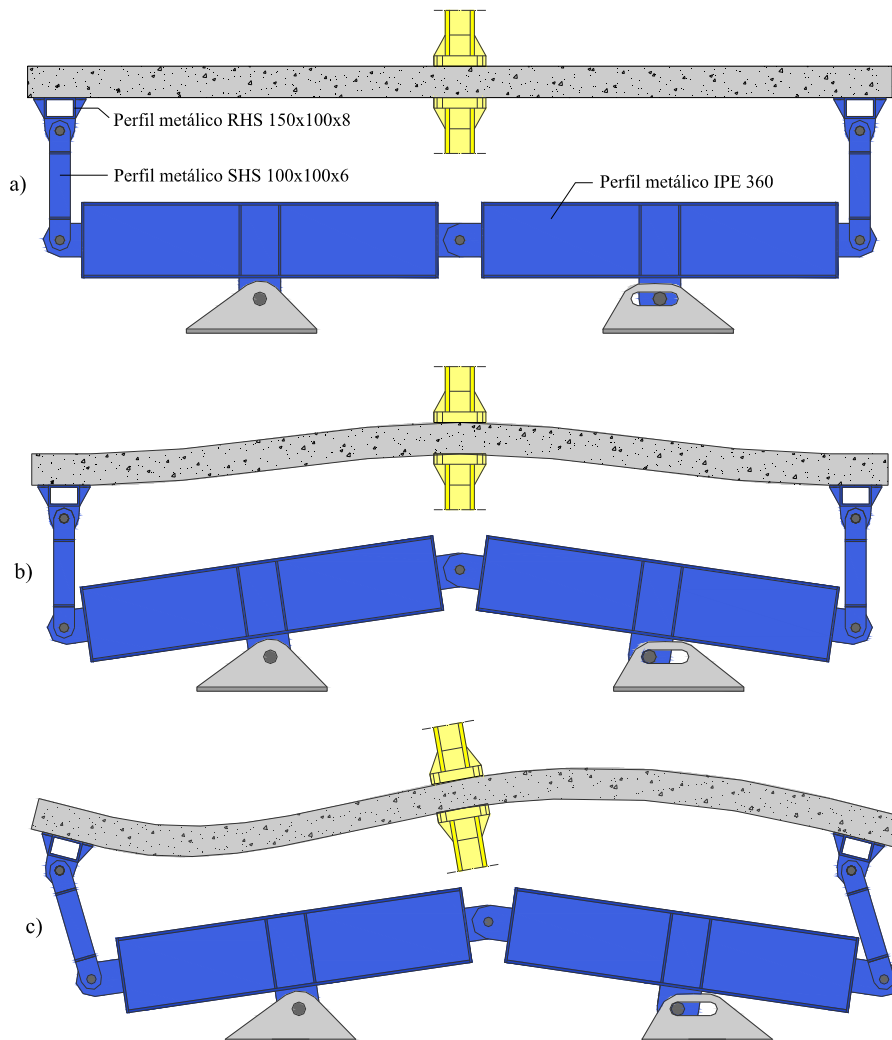
A compatibilização das rotações nos bordos N e S dos modelos é concretizada através da utilização de duas escoras bi-rotuladas conectadas a perfis metálicos verticais encastrados nos bordos da laje (Figura 7).



**Figura 7** – Sistema de compatibilização das rotações e momentos fletores: a) indeformado; b) carga gravítica e c) ação horizontal (adaptado de Almeida *et al* [38]).

Para garantir a compatibilização das condições de fronteira relativas ao esforço transversal e aos deslocamentos verticais nos bordos N e S foi desenvolvido um sistema mecânico passivo,

conforme representado na Figura 8. Este sistema garante para as cargas verticais que o esforço transversal é nulo nos bordos da laje. Para a ação horizontal, impede a rotação de corpo rígido da laje através da imposição de forças verticais nos bordos de igual valor mas de sinal oposto.



**Figura 8** - Sistema de compatibilização dos deslocamentos verticais e esforço transversal: a) indeformado; b) carga gravítica e c) ação horizontal (adaptado de Almeida *et al* [38])

O pilar foi concretizado através de dois troços de perfil metálico com chapas de aço quadradas, com 50 mm de espessura e 250 mm de lado, soldadas numa das extremidades de cada troço de pilar. Utilizaram-se quatro varões roscados M24 para conectar as duas partes do pilar à laje, aplicando-se uma força de pré-esforço de 240 kN em cada varão.

Os elementos metálicos que constituem o sistema de ensaio foram dimensionados para que a influência da sua deformabilidade nos resultados fosse minimizada. No caso do sistema de aplicação das cargas verticais não foi necessário ter esse aspeto em consideração uma vez que se trata de um sistema fechado equilibrado. A Figura 9 mostra a vista geral do sistema de ensaio.





**Figura 9** – Vista geral do sistema de ensaio.

### 3. MATERIAIS

As propriedades mecânicas dos materiais usados na produção dos modelos foram avaliadas através de ensaios experimentais. O betão de resistência normal usado foi um dos correntemente utilizados na unidade de pré-fabricação onde foram produzidos os modelos. O BER foi o estudado no Relatório 1 do presente projeto, com agregados grossos de basalto e duas areias lavadas.

Por cada modelo betonado foram realizados nove provetes cilíndricos com 300 mm de altura e 150 mm de diâmetro com o BER e o betão normal. Foram ainda produzidos seis cubos em cada betão, sendo que para o BER foram usados moldes com 100 mm de aresta e para o betão convencional foram usados moldes com 150 mm de aresta. A opção pelos cubos mais pequenos para o BER foi devido à capacidade de carga limitada da prensa hidráulica.

A resistência à compressão do betão em cilindros foi determinada de acordo com a NP EN 12390-3 [1] e os ensaios para a resistência à tração por compressão diametral foram realizados de acordo com o preconizado na NP EN 12390-6 [2]. O módulo de elasticidade dos betões foi determinado através de ensaios de compressão em cilindros de acordo com a especificação E-397 do LNEC [3]. Foi necessário tratar a superfície dos cilindros de forma a garantir a sua planeza para os ensaios de compressão e do módulo de elasticidade. Os provetes de betão foram ensaiados no mesmo dia do modelo respetivo.

De cada tipo de varões de aço utilizados na fabricação das armaduras longitudinais dos modelos foram recolhidas e caracterizadas através de ensaios de tração três provetes, seguindo as indicações da EN 10002-1 [4]. O Quadro 2 mostra o valor médio dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos materiais.

**Quadro 2** – Propriedades mecânicas dos betões utilizados nos modelos com carga horizontal (MPa).

Modelo		$f_c$	$f_{cc,150}$	$f_{cc,100}$	$f_{ct,sp}$	$E_c (x10^3)$
C-50	Betão Normal	52,4	-	-	2,9	-
CHSC1	BER	115,2	-	120,1	4,1	53,7
	Betão Normal	61,6	66,3	-	7,1	35,7
CHSC2	BER	120,2	-	124,8	7,4	51,4
	Betão Normal	45,9	46,5	-	3,5	37,3
CHSC3	BER	123,6	-	127,2	8,2	52,8
	Betão Normal	48,9	52,5	-	-	35,3

$f_c$  - Resistência à compressão do betão em cilindros 150x300;

$f_{cc,150}$  - Resistência à compressão do betão em cubos 150x150x150;

$f_{cc,100}$  - Resistência à compressão do betão em cubos 100x100x100;

$f_{ct,sp}$  - Resistência à tração do betão por compressão diametral em cilindros 150x300;

$E_c$  - Módulo de elasticidade do betão.

**Quadro 3** – Propriedades mecânicas do aço das armaduras longitudinais.

$f_y$ (MPa)		$\epsilon_y$ (%)		$E_y$ (GPa)	
Ø10	Ø12	Ø10	Ø12	Ø10	Ø12
534,9	525,8	2,7	2,6	198	200

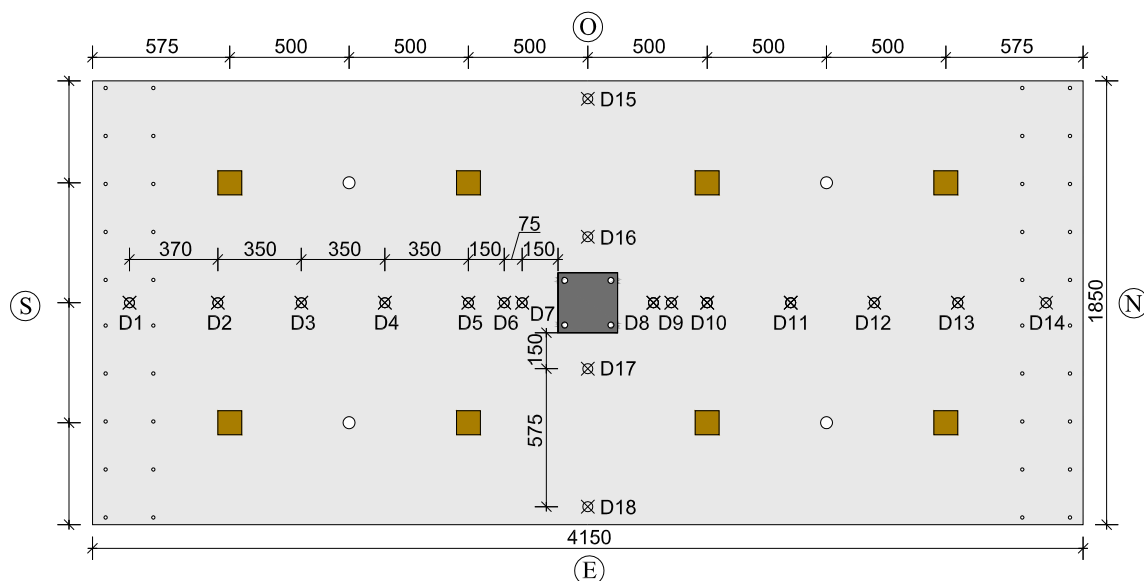
$f_y$  - Tensão de cedência do aço;

$\epsilon_y$  - Extensão de cedência do aço;

$E_y$  - Módulo de elasticidade do aço.

#### 4. INSTRUMENTAÇÃO

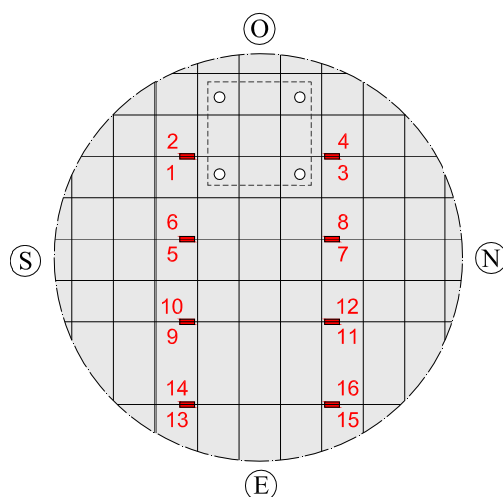
Para avaliar o desempenho das lajes ensaiadas foram usados vários equipamentos para medição de deslocamento, força e extensão. Foram usados 18 defletómetros elétricos para medir os deslocamentos verticais na face superior dos modelos, 14 dispostos na direção longitudinal e quatro na direção transversal, conforme esquematizado na Figura 10.



**Figura 10** – Planta com pontos de aplicação das forças verticais e distribuição dos defletómetros.

A carga vertical aplicada em oito pontos da laje (Figura 10), que simula o efeito da carga gravítica distribuída na sua superfície, foi medida por uma célula de carga em cada uma das quatro vigas de distribuição apoiadas em chapas de aço. A carga e o deslocamento horizontal aplicados no topo superior do pilar pelo atuador mecânico foram monitorizados através de uma célula de carga e de um defletómetro elétrico de fio, respetivamente, esquematizados na Figura 6.

As extensões de alguns varões da armadura longitudinal superior foi monitorizada através de 16 extensómetros elétricos, conforme representado na Figura 11. Em cada varão instrumentado foram colados dois pares de extensómetros, um em cada lado do pilar. Os extensómetros foram colados na lateral dos varões e em posição lateralmente oposta. Os pontos monitorizados encontram-se a 50 mm da face do pilar. As Figuras 12 e 13 mostram o modelo CHSC2 com todo o equipamento de monitorização montado.



**Figura 11** – Posição dos extensómetros usados na armadura superior.



**Figura 12** – Equipamento de monitorização e de aquisição de dados.



Figura 13 – Vista geral do equipamento do modelo e equipamento de monitorização.

## 5. PROTOCOLO DE ENSAIO

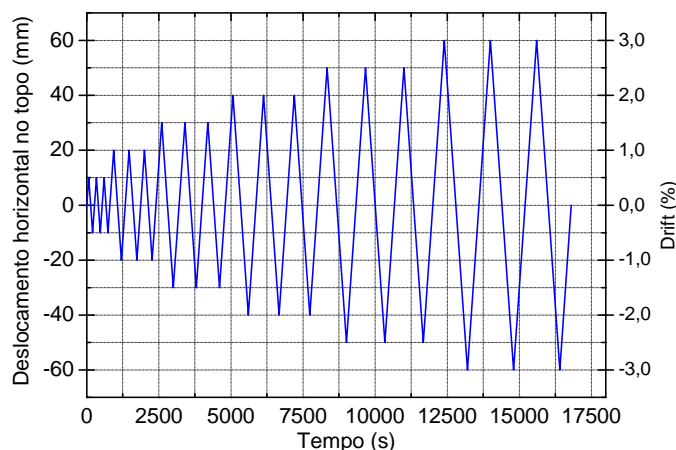
Os modelos ensaiados foram submetidos a uma carga vertical constante, distribuída por oito pontos da superfície superior da laje, de valor igual a 50% do valor da capacidade de carga ao punçamento estimada pelo EC2 [5]. A este valor foi subtraído a soma do peso próprio da laje e dos elementos do sistema de ensaio e de monitorização que contribuem para a carga de punçamento dos modelos, num total de aproximadamente 39,4 kN.

Como se pretende estudar o efeito da utilização parcial de BER no melhoria do desempenho ao punçamento sobre ações horizontais cíclicas, nos modelos com utilização parcial de BER foram usadas as características mecânicas do betão de resistência normal para o cálculo da carga de rotura ao punçamento. A carga vertical foi aplicada a uma taxa de 30 kN/min. O Quadro 4 apresenta o valor total da carga vertical aplicada a cada modelo, incluindo o peso próprio da laje e do sistema de ensaio. A Após atingir o valor da carga gravítica definido para cada modelo foram aplicados deslocamentos cíclicos no topo do pilar para ambas as direções a uma taxa de 9 mm/min. O deslocamento horizontal cíclico imposto seguiu o protocolo apresentado na Figura 14.

Quadro 4 – Propriedades mecânicas do aço das armaduras longitudinais.

Modelo	C-50	CHSC1	CHSC2	CHSC3
$V_{exp,c}$	203,4	221,6	199,7	212,9

$V_{exp,c}$  – carga vertical aplicada.



**Figura 14** – Protocolo de aplicação da ação horizontal cíclica.

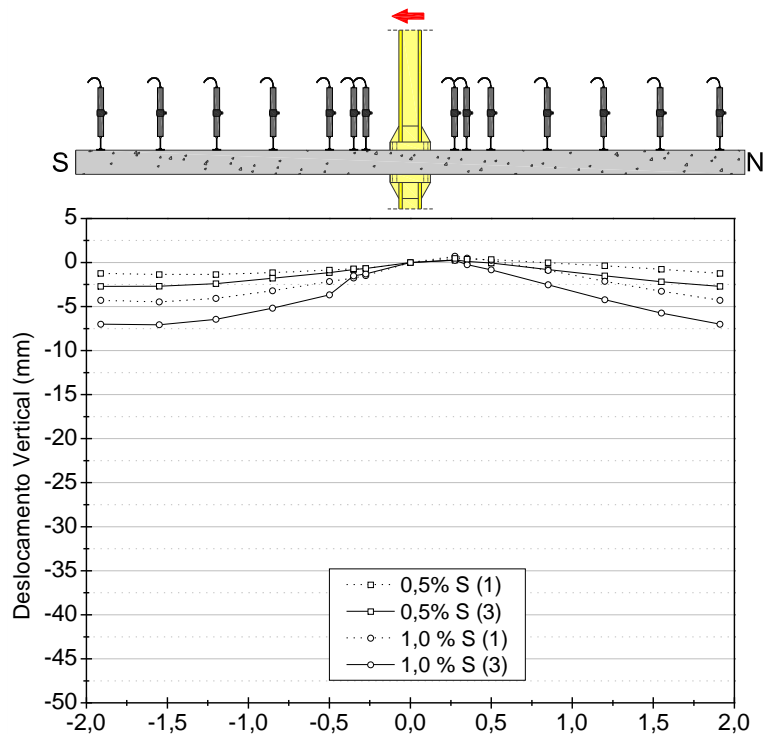
## 6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nas secções seguintes são apresentados e analisados os resultados experimentais em termos de deformação, extensão das armaduras longitudinais, capacidade de drift, diagrama histerético e amortecimento viscoso.

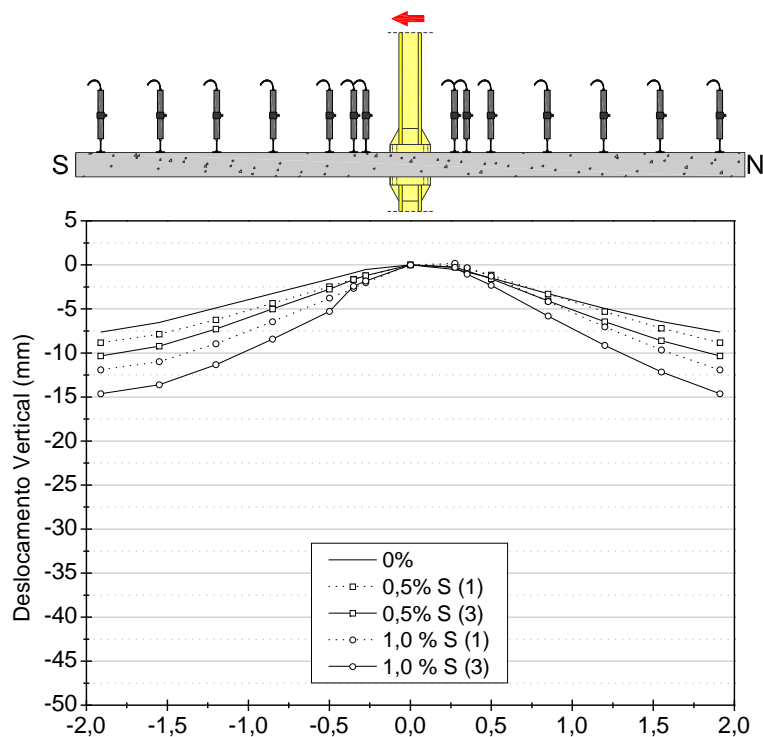
### 6.1. Deslocamentos verticais

Foram utilizados 14 defletómetros elétricos distribuídos na direção longitudinal dos modelos (N-S) que permitem analisar a deformação dos mesmos ao longo do ensaio. Os deslocamentos verticais medidos no ensaio foram utilizados para traçar diagramas de deformação para o carregamento vertical e para o primeiro e o terceiro ciclos de cada patamar de *drift* imposto no sentido N-S. De forma a facilitar a análise de resultados, para cada modelo foram elaborados dois gráficos de deformação: um onde não foi considerada a deformação inicial devido à aplicação da carga gravítica da primeira fase de carregamento e outro com todos os efeitos sobrepostos.

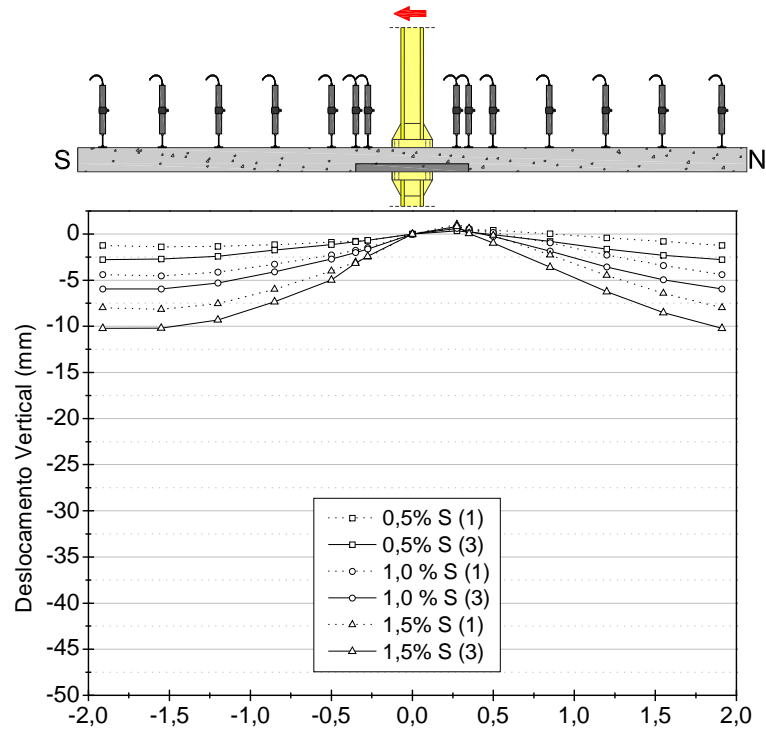
Nas Figuras 15 a 22 são apresentados diagramas com a posição deformada para os vários patamares de deslocamento horizontal aplicado no topo do pilar. Nos perfis longitudinais apresentados podem ser observados pontos de inflexão no lado Sul dos modelos que indicam a contribuição do sistema de compatibilização de rotações. Nos gráficos onde não foi considerada a deformação inicial devido à carga vertical aplicada é mais evidente o efeito da mobilidade da linha de momentos nulos em função da rigidez da laje.



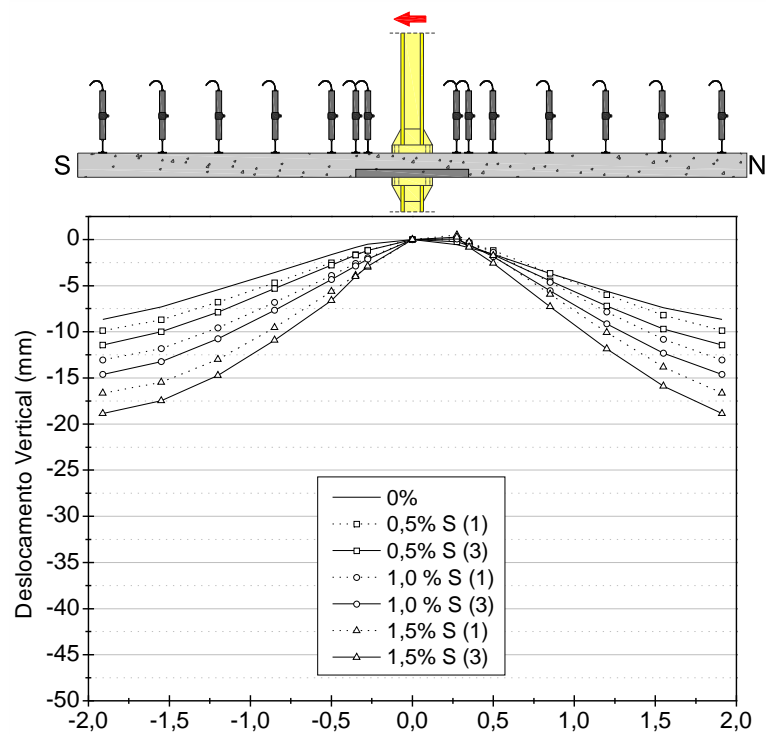
**Figura 15** - Modelo C-50: perfis longitudinais para os primeiros e terceiros ciclos dos diferentes níveis de drift – efeito isolado da carga horizontal no topo do pilar.



**Figura 16** – Modelo C-50: perfis longitudinais para os primeiros e terceiros ciclos dos diferentes níveis de drift – efeito total.

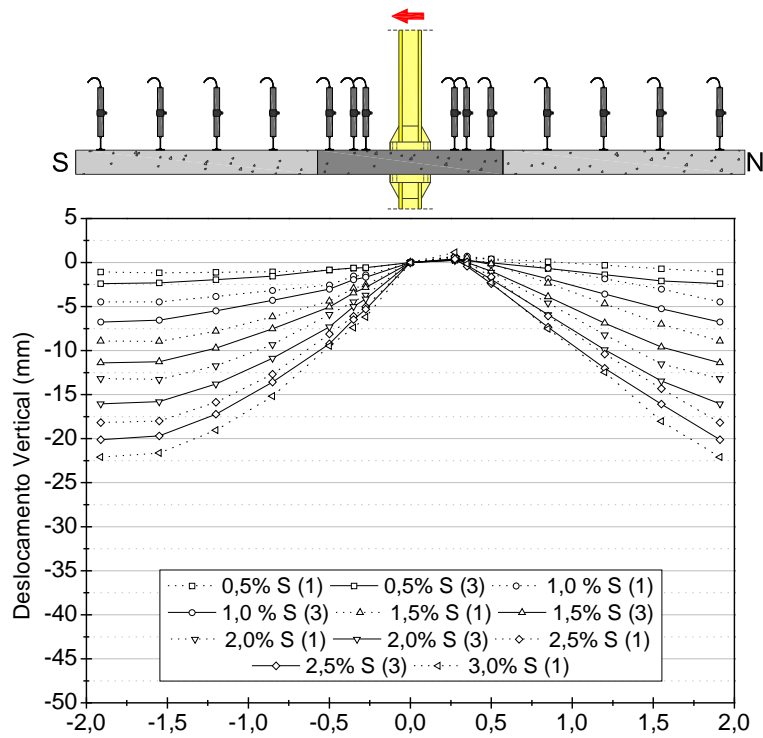


**Figura 17-** Modelo CHSC1: perfis longitudinais para os primeiros e terceiros ciclos dos diferentes níveis de *drift* – efeito isolado da carga horizontal no topo do pilar.

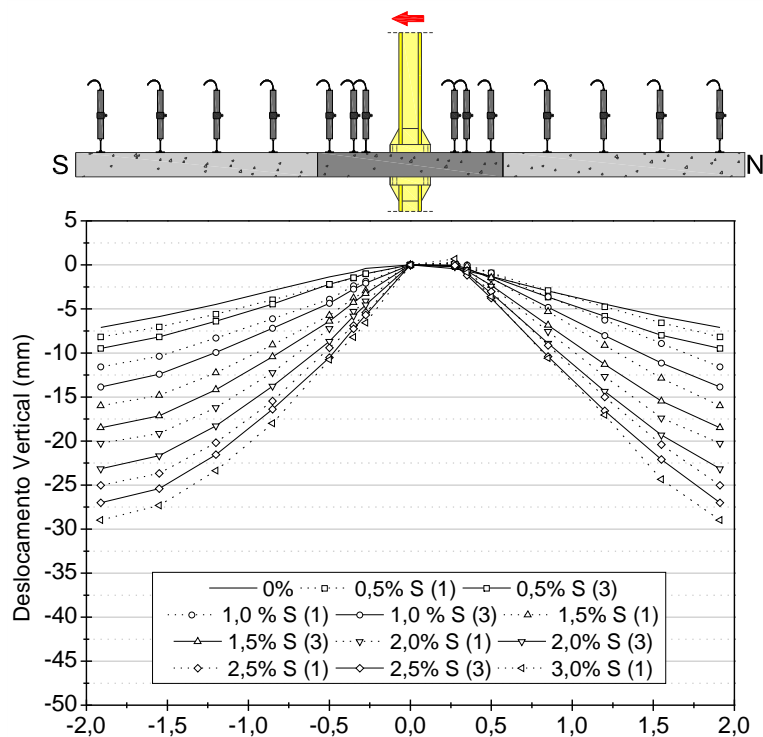


**Figura 18 - -** Modelo CHSC1: perfis longitudinais para os primeiros e terceiros ciclos dos diferentes níveis de *drift* – efeito total.



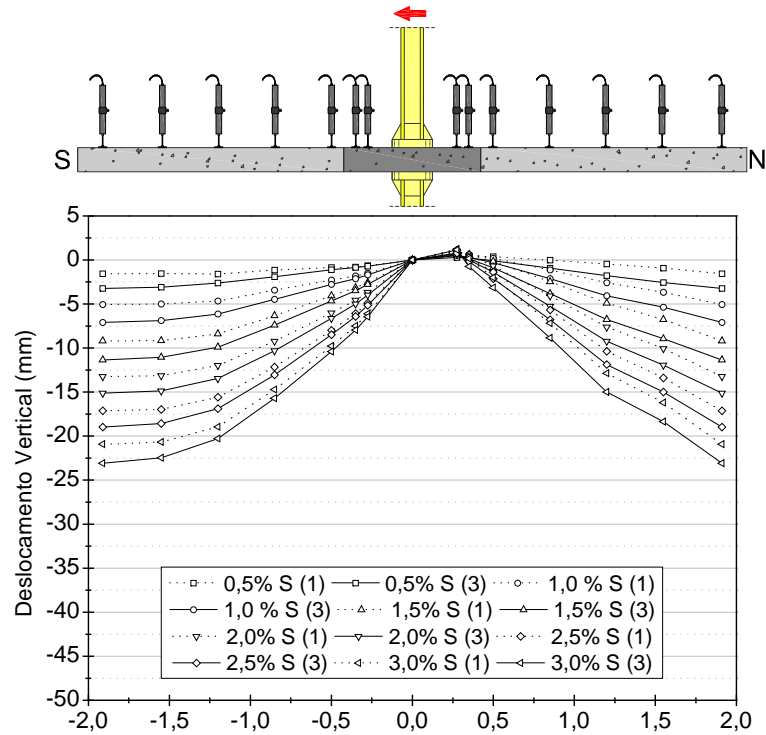


**Figura 19** - Modelo CHSC2: perfis longitudinais para os primeiros e terceiros ciclos dos diferentes níveis de *drift* – efeito isolado da carga horizontal no topo do pilar.

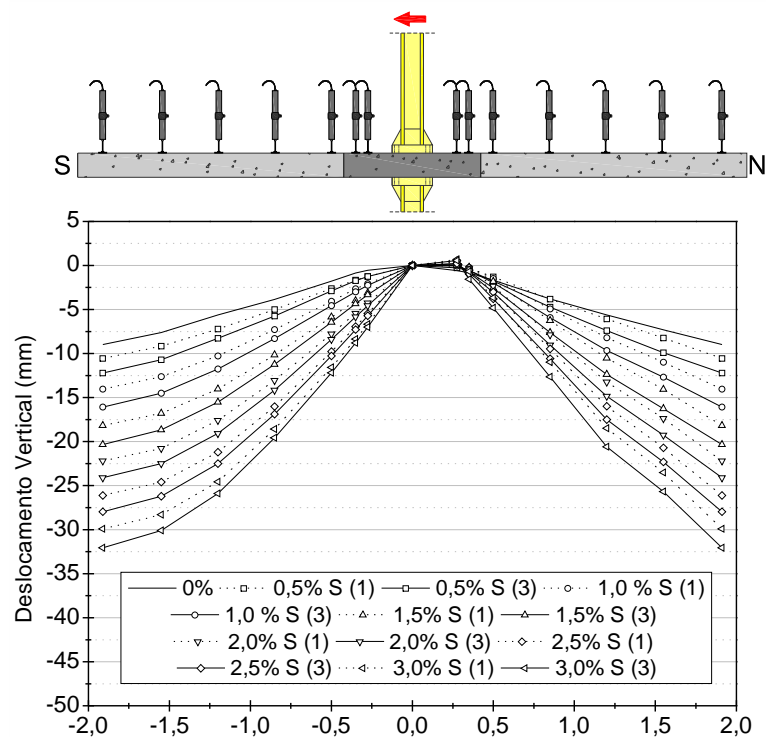


**Figura 20** – Modelo CHSC2: perfis longitudinais para os primeiros e terceiros ciclos dos diferentes níveis de *drift* – efeito total.





**Figura 21** - Modelo CHSC3: perfis longitudinais para os primeiros e terceiros ciclos dos diferentes níveis de *drift* – efeito isolado da carga horizontal no topo do pilar.



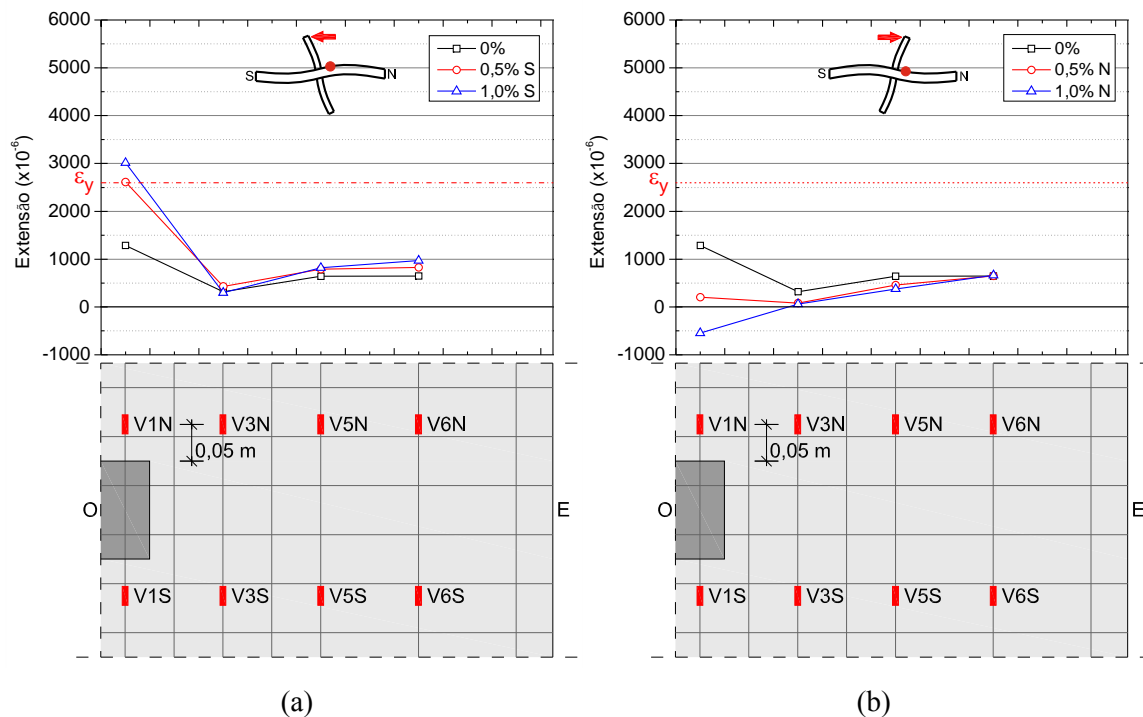
**Figura 22** - Modelo CHSC3: perfis longitudinais para os primeiros e terceiros ciclos dos diferentes níveis de *drift* – efeito total.

Para níveis mais elevados de deslocamento horizontal imposto no sentido N-S, o perfil longitudinal apresenta um ponto de descontinuidade próximo do pilar no lado Norte. O elevado nível e fendilhação nessa zona da laje leva à observação deste efeito no perfil deformado. Quando o deslocamento imposto toma o sentido S-N, o comportamento inverso é esperado. Verifica-se ainda que os bordos são livres de deformar e apresentam deslocamentos verticais iguais entre si.

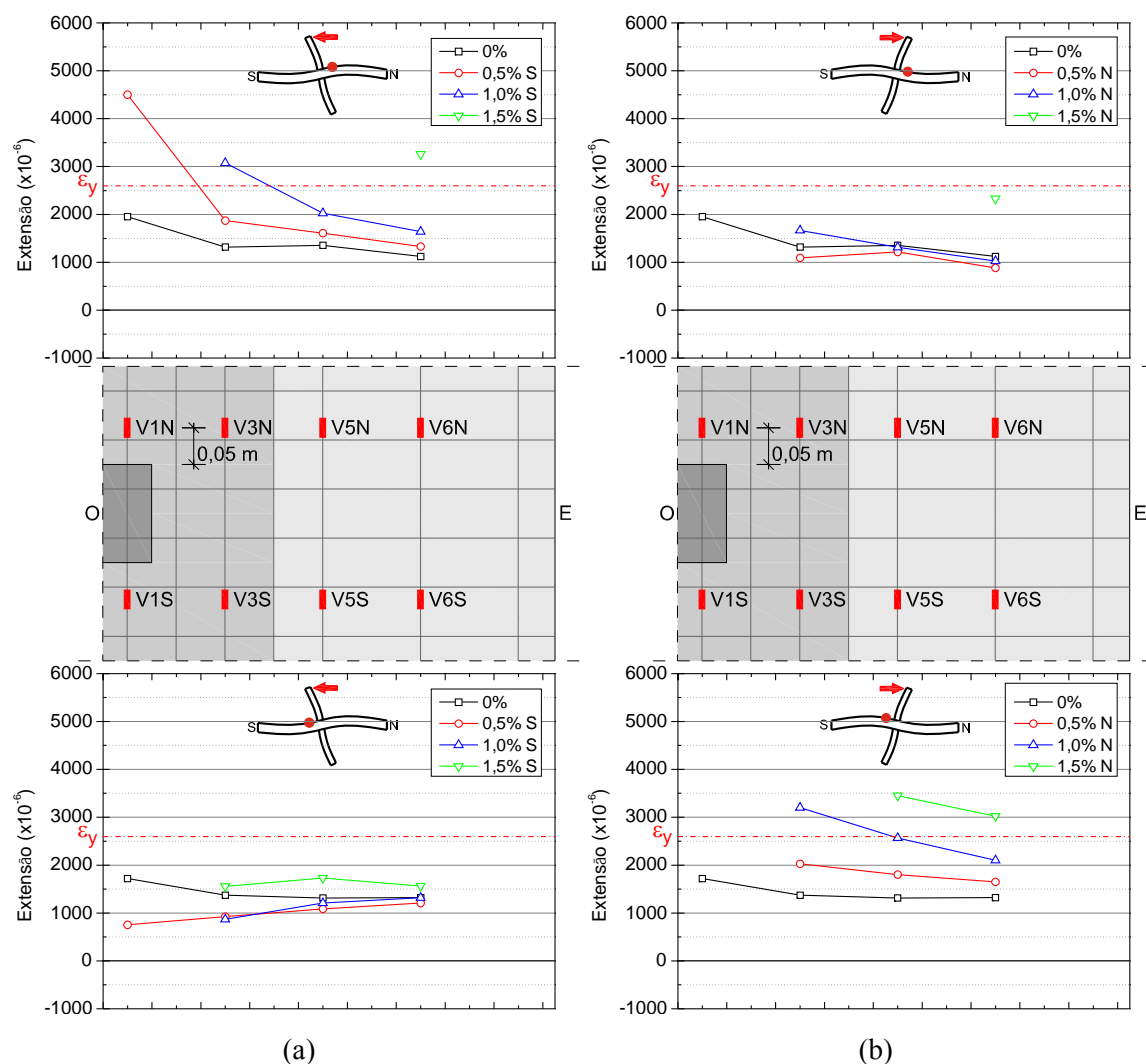
O deslocamento vertical observado para o carregamento vertical inicialmente aplicado é idêntico em todos os modelos, com tendência a aumentar com o valor da carga vertical, independentemente da constituição dos modelos. Em todos os modelos a deformação aumenta com o número de ciclos impostos dentro de um determinado patamar de *drift*, o que indica que apesar da principal causa da degradação dos modelos ser o aumento da amplitude do deslocamento horizontal, existe degradação considerável entre ciclos de igual valor. A variação da quantidade de BER utilizado e da sua geometria não introduziu alterações relevantes na deformação dos modelos, tanto em termos de magnitude como de formato.

## 6.2. Extensão nas armaduras longitudinais

A colagem de extensómetros eléctricos em alguns varões da armadura longitudinal superior permitiu traçar os diagramas das Figuras 23 a 26, onde é apresentada a distribuição transversal da extensão do lado N e S do pilar, para vários patamares de deslocamento horizontal imposto.



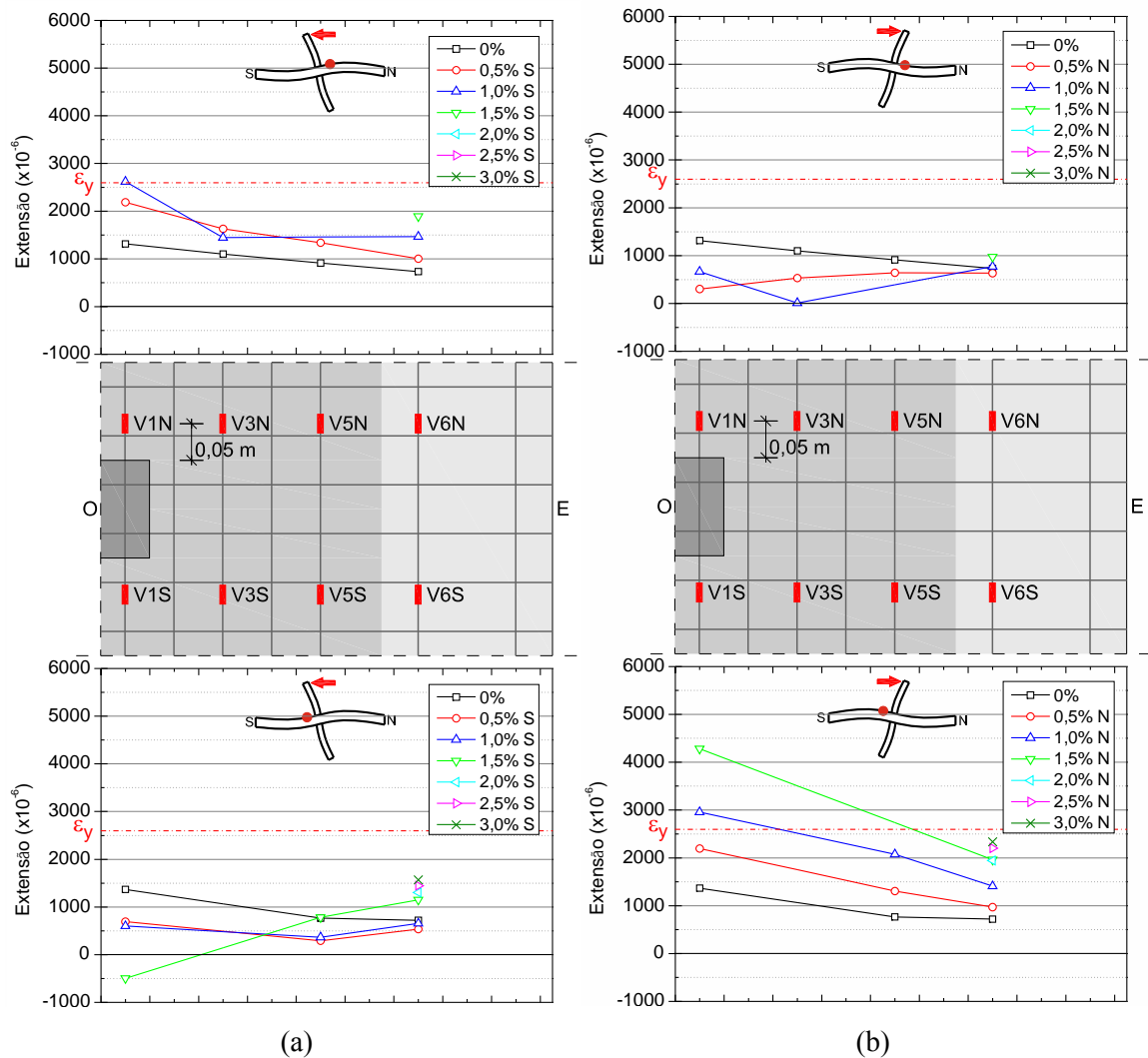
**Figura 23** – Modelo C-50 - Extensões na armadura longitudinal superior para diferentes *drifts*: (a) sentido N-S e (b) sentido S-N.



**Figura 24** - Modelo CHSC 1 - Extensões na armadura longitudinal superior para diferentes *drifts*: (a) sentido N-S e (b) sentido S-N.

Na primeira fase do ensaio, em que se aplicou o carregamento gravítico, nenhum dos varões instrumentados atingiu a cedência. A distribuição transversal toma uma tendência crescente à medida que os varões instrumentados se encontram mais próximos do pilar, como seria de esperar, uma vez que o momento fletor negativo é maior na zona circunjacente do pilar.

De uma forma geral, os valores de extensão registados no fim da aplicação da carga vertical vertical são tanto maiores quanto mais elevado é o carregamento, independentemente da geometria em planta e em alçado da zona da laje em BER. Para o valor final da carga vertical, os extensómetros posicionados no lado norte do varão mais próximo do centro do modelo SHSC3 apresentam valores de extensão muito próximos da extensão de cedência determinada nos ensaios de caracterização do aço das armaduras, representados nos gráficos através de uma linha vermelha a traço ponto.

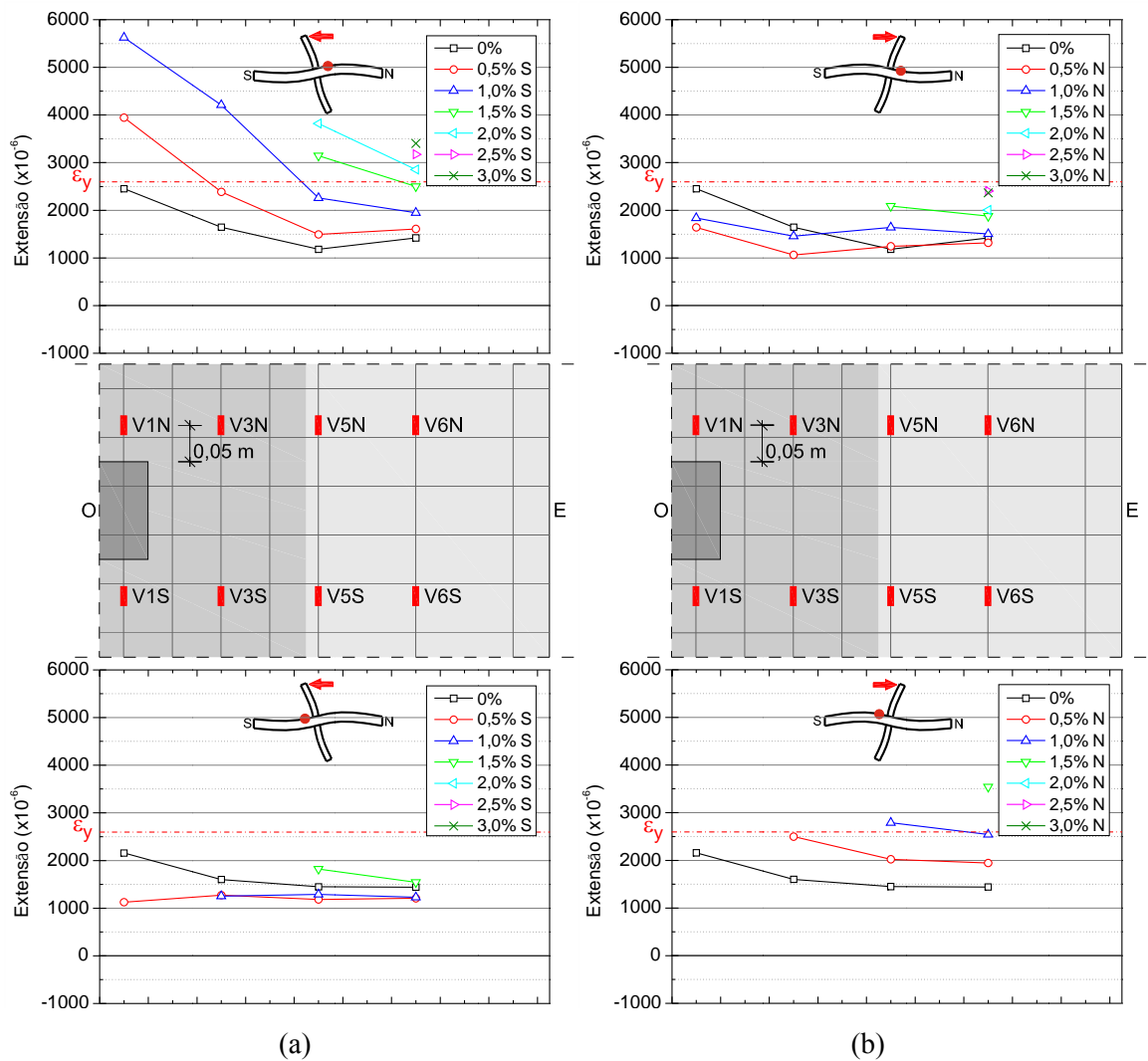


**Figura 25** - Modelo CHSC 2 - Extensões na armadura longitudinal superior para diferentes *drifts*: (a) sentido N-S e (b) sentido S-N.

Na zona central dos modelos, durante a aplicação da carga vertical, formaram-se fendas na direção E-O provocadas pelos esforços de flexão negativos, que se propagaram até aos bordos longitudinais, conforme está ilustrado na Figura 26. Paralelamente aos bordos transversais surgiram fendas na face inferior, referentes ao momento fletor positivo. A distribuição transversal de extensões de cada modelo para o carregamento gravítico é praticamente simétrica o que sugere a continuidade do diagrama de momentos na zona do pilar.



**Figura 26** – Distribuição da fendilhação de flexão na face superior do modelo SHSC3 após a aplicação do carregamento vertical.



**Figura 27** - Modelo CHSC 3 - Extensões na armadura longitudinal superior para diferentes drifts: (a) sentido N-S e (b) sentido S-N.

Na segunda fase do ensaio, que consistiu na imposição de deslocamentos horizontais cíclicos no topo do pilar, surge na laje um momento fletor excêntrico junto ao pilar que leva a uma descontinuidade no diagrama de momentos fletores resultantes das duas ações. Quando o deslocamento horizontal é aplicado na direção N-S, o momento fletor negativo no lado N aumenta e no lado S diminui. O efeito contrário é observado quando a direção da ação horizontal toma o sentido oposto.

Os gráficos da distribuição transversal de extensões medidas durante os ensaios mostram o efeito do momento desequilibrado. A variação de extensão devido à ação cíclica é bastante menor nos varões mais afastados do que nos varões mais próximos do pilar. No modelo C-50 o varão instrumentado mais próximo do pilar entrou em cedência e nos modelos CHSC1 e CHSC3 a tendência da distribuição transversal indica que todos os varões instrumentados atingiram a cedência. No modelo SHSC2 pelo menos o varão mais próximo do pilar atingiu a extensão de cedência, não sendo possível tirar ilações quanto aos restantes devido à avaria de extensómetros durante o ensaio.

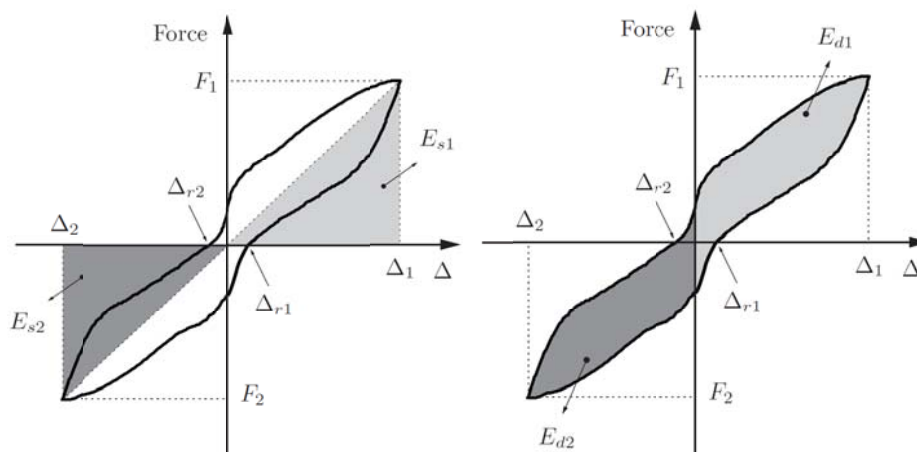
### **6.3. Coeficiente de amortecimento**

Para quantificar a capacidade de dissipação de energia, o coeficiente de amortecimento viscoso foi calculado de acordo com Hose e Seible [6]. Este parâmetro relaciona a energia dissipada em cada ciclo com a necessária para atingir o pico de cada ciclo de forma linear. Segundo o autor, diferentes tipos de comportamentos podem ser associados com diferentes valores deste coeficiente. O coeficiente de amortecimento viscoso foi calculado usando a seguinte expressão (1):

$$\xi_{eq} = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{E_{d1}}{E_{S1}} + \frac{E_{d2}}{E_{S2}} \right) \quad (1)$$

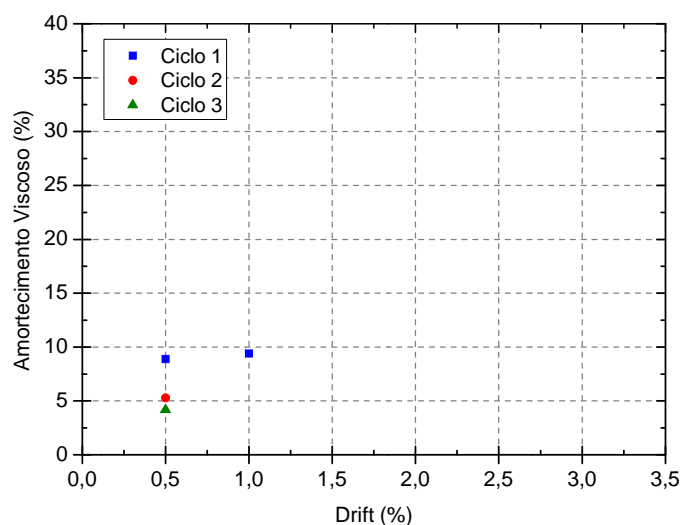
Em que:

- $E_{d1}$  é a energia dissipada para os ciclos positivos;
- $E_{d2}$  é a energia dissipada para os ciclos negativos;
- $E_{S1}$  é a energia elástica para os ciclos positivos;
- $E_{S2}$  é a energia elástica para os ciclos negativos, conforme definido na Figura 28.



**Figura 28** – Diagrama histerético típico para uma ação cíclica [7].

Nas Figuras 29 a 32 são apresentados os valores do coeficiente de amortecimento para cada ciclo completo dos modelos. Os gráficos mostram uma tendência crescente no valor do coeficiente de amortecimento viscoso à medida que os drifts aumentam. Este fenómeno deve-se à dissipação de energia pela plastificação das armaduras longitudinais.



**Figura 29** – Modelo C50 – Coeficiente de amortecimento viscoso para cada ciclo completo.

O primeiro ciclo de cada patamar de deslocamento horizontal imposto é o que dissipa mais energia. Este fenómeno é explicado pelo facto de que a primeira vez que um novo patamar de drift é atingido, é provocado um dano considerável na laje, dissipando assim energia. Do ponto de vista de dissipação de energia, o baixo valor do coeficiente de amortecimento está associado à baixa capacidade de dissipação de energia. Comparando os vários modelos, no que respeita ao coeficiente de amortecimento dos ciclos realizados antes da rotura, não se observam diferenças relevantes.

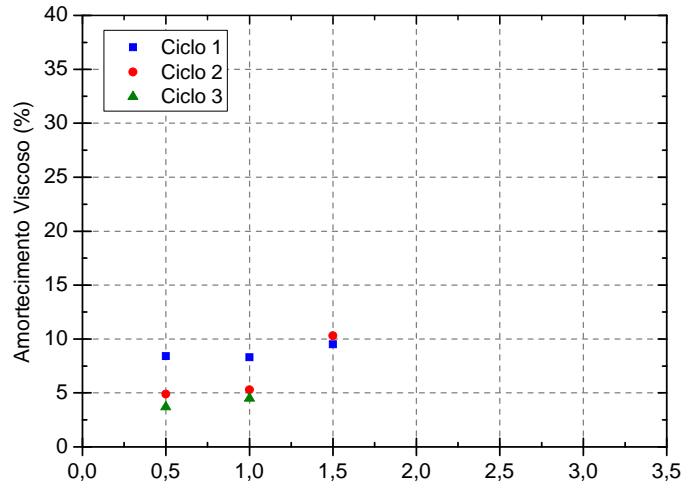


Figura 30 – Modelo CHSC 1 – Coeficiente de amortecimento viscoso para cada ciclo completo.

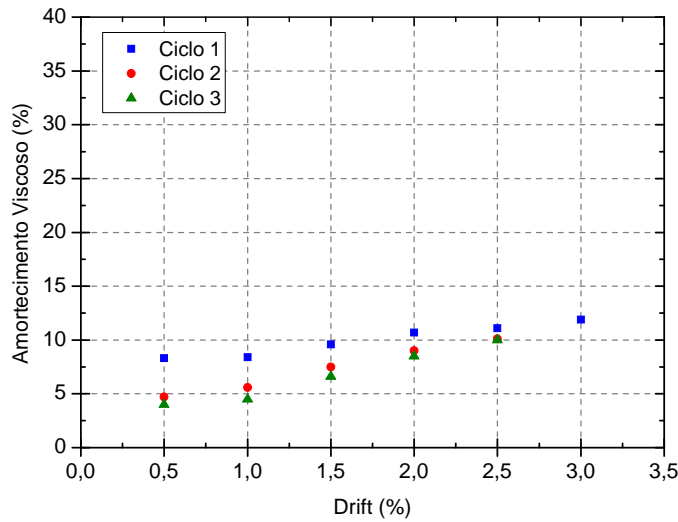


Figura 31 – Modelo CHSC 2 – Coeficiente de amortecimento viscoso para cada ciclo completo.

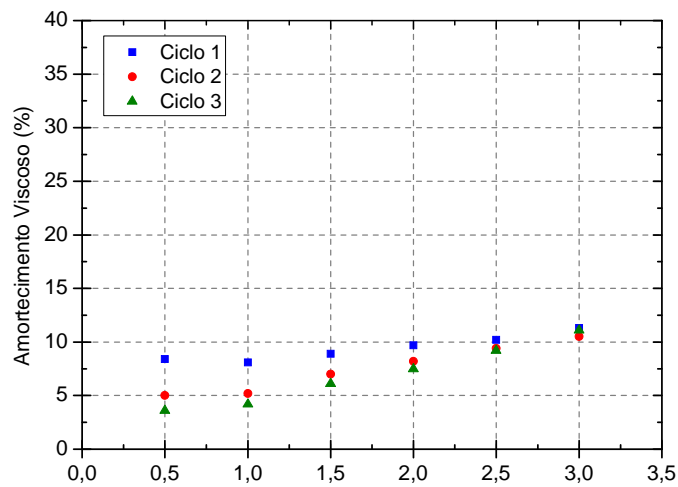
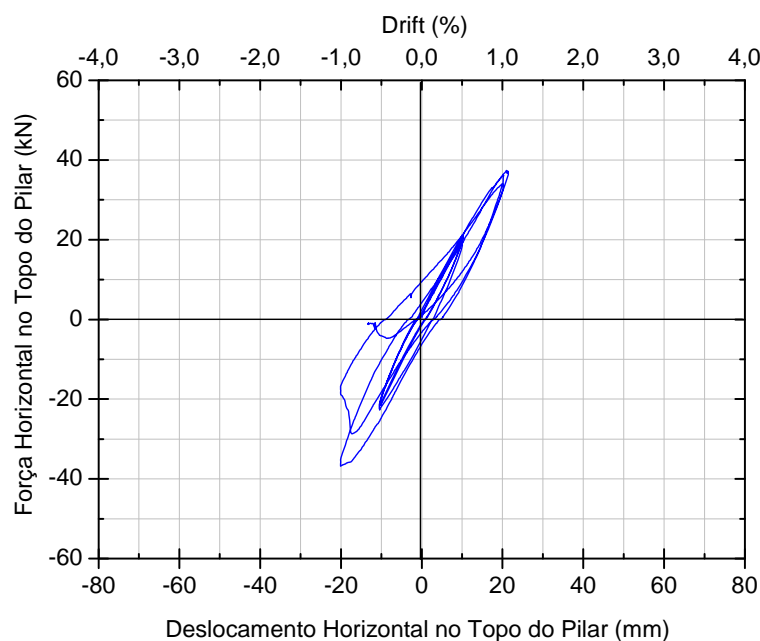


Figura 32 – Modelo CHSC 3 – Coeficiente de amortecimento viscoso para cada ciclo completo.



#### 6.4. Diagrama histerético

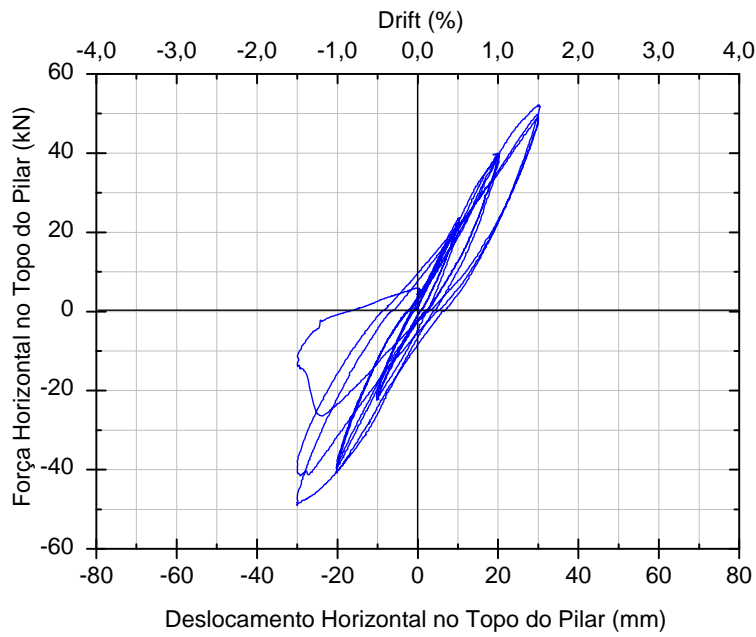
Nas Figura 33 a Figura 36 são apresentados os diagramas histeréticos dos vários modelos. O modelo C-50, usado como modelo de referência, entrou em rotura por punçoamento durante o terceiro ciclo de 1,0% de *drift*. O gráfico histerético deste modelo mostra um comportamento quase linear tanto na carga como na descarga. A perda de rigidez é inexistente ou desprezável até à rotura. A forma estreita do diagrama indica a baixa capacidade de dissipação de energia.



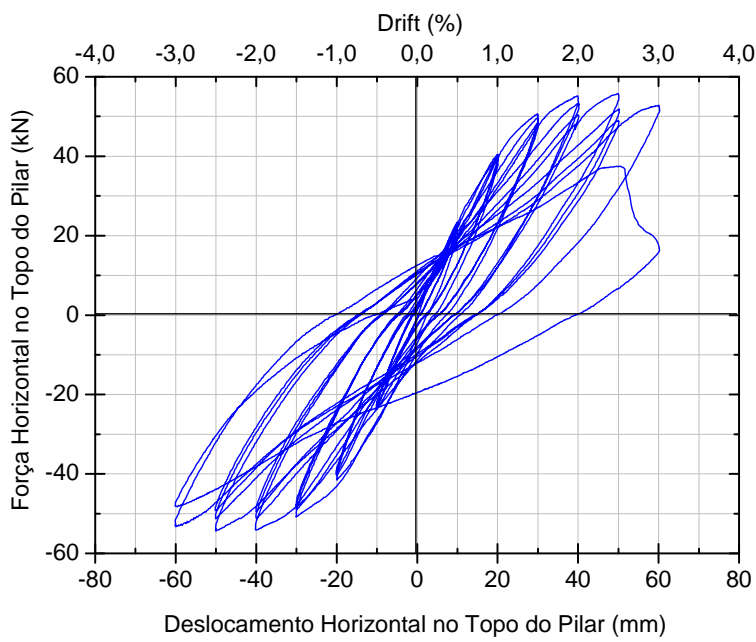
**Figura 33** – Modelo C-50 – diagrama histerético.

A rotura dos modelos com utilização parcial de BER registou-se no final do terceiro ciclo de 1,5% no caso do SHSC1, no segundo ciclo de 3,0% no caso do SHSC2 e na fase de transição entre os patamares de drift de 3,0% e 3,5% no caso do modelo SHSC3. Em todos os modelos com BER se observou uma resposta quase linear nos dois primeiros patamares de deslocamento horizontal cíclico. Nos ciclos de *drift* igual ou superior a 1,5% é evidente a perda de rigidez tanto entre ciclos do mesmo patamar como entre ciclos de patamares diferentes. A degradação dos modelos associada à plastificação das armaduras justifica o comportamento observado.

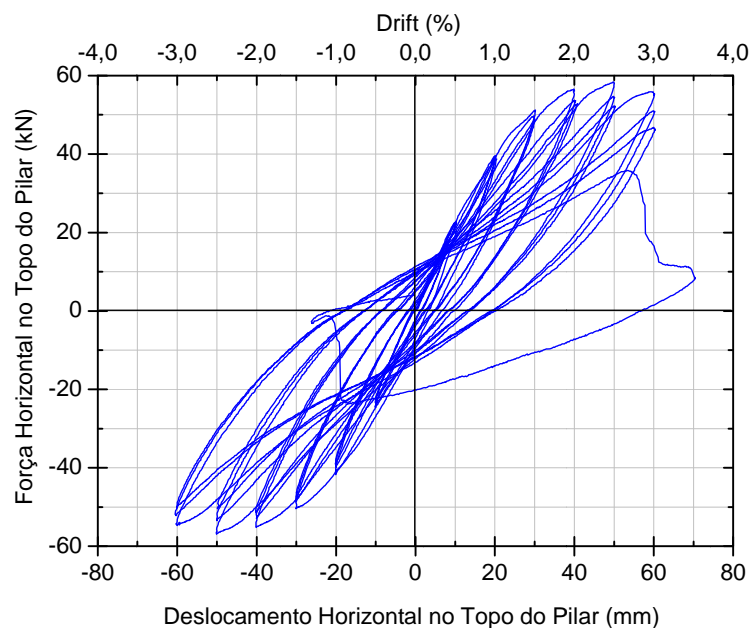
A utilização parcial de BER mostrou ser uma solução capaz de aumentar a capacidade resistente da laje a ações horizontais suportando *drifts* elevados, associados ao aumento da capacidade de dissipação de energia. A Figura 37 mostra a fendilhação junto ao pilar, na face superior dos modelos SHSC2 e SHSC3.



**Figura 34** – Modelo CHSC 1 – diagrama histerético.



**Figura 35** – Modelo CHSC 2 – diagrama histerético.



**Figura 36** – Modelo CHSC 3 – diagrama histerético.



(a)

(b)

**Figura 37** - Vista superior dos modelos: (a) SHSC2 para 2,5% para S e (b) SHSC3 para 3,0% para N.

## 7. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi estudada a utilização de BER melhorar o comportamento de lajes fungiformes sobre a ação horizontal cíclica. A técnica usada consistiu na utilização parcial de BER na zona do pilar fazendo-se varia as dimensões da zona em BER em espessura e em área.

Foi utilizado um sistema de ensaio inovador que pretendia aproximar as condições de fronteira do ensaio às da uma estrutura real. O sistema de ensaio cumpriu os propósitos para os quais foi projetado. Os deslocamentos verticais foram adequadamente compatibilizados e o sistema responsável por garantir os momentos positivos nos bordos norte e sul do modelo cumpriram os objetivos propostos.

O modelo produzido com betão convencional apresentou baixa capacidade de resistir a um deslocamento horizontal imposto no topo do pilar e pouca capacidade de dissipar energia. O modelo SHSC1, com BER apenas na espessura de 1/3 da espessura total da laje, apresentou ligeiramente melhor capacidade de resistir à imposição de um deslocamento no topo do pilar mas no entanto manteve um comportamento considerado insuficiente.

Os resultados dos modelos com utilização parcial de BER em toda a sua espessura (SHCS2 e SHSC3) e diferentes áreas em planta revelaram o melhoramento o comportamento deste tipo de estruturas sobre ações horizontais cíclicas. Ambos os modelos atingiram a rotura para um *drift* de 3,0% ao invés de 1,0% e 1,5% observados nos modelos C-50 e CHSC1, respetivamente. O aumento da capacidade resistente a forças horizontais, da capacidade de dissipação de energia e de admitir deslocamentos horizontais cíclicos mais elevados torna esta solução adequada para aplicação em edifícios sujeitos a este tipo de ações.

## **8. AGRADECIMENTOS**

Este trabalho foi elaborado no âmbito do projeto HiCon - Uso Racional de Betão de Alta Resistência em Estruturas de Laje Fungiforme Sujeitas a Ações Cíclicas e Sísmicas (EXPL/EC M-EST/1371/2013), com o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia - Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior.

Este projeto sobre o comportamento de lajes fungiformes com a utilização racional de betão de elevada resistência sob a ação de cargas gravíticas e sísmicas deu já origem a várias publicações [8-44], servindo estas de meio de divulgação da investigação realizada.

## **9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] IPQ, “NP EN 12390-3: Ensaio do betão endurecido - Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio.” Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica, Portugal, p. 21, 2003.
- [2] IPQ, “NP EN 12390-6: Ensaio do betão endurecido - Parte 6: Resistência à tração por compressão de provetes.” Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica, Portugal, p. 14, 2003.
- [3] LNEC, “E397 - Determinação do módulo de elasticidade em compressão.” Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, p. 2, 1993.
- [4] IPQ, “NP EN 10002-1: Materiais metálicos. Ensaio de tração - Parte 1: Método de ensaio.” Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica, Portugal, p. 35, 1990.

- [5] IPQ, “NP EN 1992-1-1 Eurocódigo 2: Projecto de Estruturas de Betão – Parte 1-1: Regras Gerais e Regras para Edifícios.” Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica, Portugal, p. 259, 2010.
- [6] Seible, F., “Performance Evaluation Database for Concrete Bridge Components and Systems under Simulated Seismic Loads,” University of California, 1999.
- [7] Marreiros, R., Lúcio, V., and Pampanin, S., “Precast Concrete Wall-Foundation Connection - Development of a seismic dissipative connection,” Universidade Nova de Lisboa, 2014.
- [8] RAMOS, A. M. P. e LÚCIO, V. - Post-Punching Behaviour of Prestressed Concrete Flat Slabs. Magazine of Concrete Research, Thomas Telford, 60, no. 4, Maio, 2008.
- [9] FARIA, D., BISCAIA, H., LÚCIO, V. e RAMOS, A – *Punching of reinforced concrete slabs and experimental analysis and comparison with codes*. Proceedings of IABSE-Fib Codes in Structural Engineering – Developments and Needs for International Practice, Cavtat, Dubrovnik, Croácia, Maio 2010.
- [10] GOMES, J. e RAMOS, A. *Estudo Experimental do Punçoamento em Lajes Reforçadas com Armadura Transversal Aderente Pós-Instalada*, Encontro Nacional Betão Estrutural 2010, Lisboa, Novembro, 2010.
- [11] PAIAS, J. e RAMOS, A. - *Estudo Experimental do Punçoamento em Lajes de Betão Reforçado com Fibras de Aço*, Encontro Nacional Betão Estrutural 2010, Lisboa, Novembro, 2010.
- [12] RAMOS, A. P., LÚCIO, V e REGAN, P.E. - *Punching of flat slabs with in-plane forces*, Engineering Structures, Volume 33, Issue 3 , Março, 2011.
- [13] FARIA, D.; LÚCIO, V.; RAMOS, A. – *Strengthening of flat slabs with post-tensioning using anchorages by bonding*. Engineering and Structures, Volume 33, Junho 2011, págs. 2025-2043.
- [14] FARIA, D., BISCAIA, H., LÚCIO, V. e RAMOS, A - *Material and geometrical parameters affecting punching of reinforced concrete flat slabs with orthogonal reinforcement*. Short Paper, fib Symposium PRAGUE 2011 – Concrete Engineering for Excellence and Efficiency, Praga, República Checa, Junho 2011.

- [15] RAMOS, A., LÚCIO, V., FARIA, D. e INÁCIO, M. - *Punching Research at Universidade Nova de Lisboa. Design Of Concrete Structures and Bridges Using Eurocodes*, Bratislava, Eslováquia, Setembro 2011.
- [16] FARIA, D., LÚCIO, V., e RAMOS, A. - *Pull-out and push-in tests of bonded steel strands*. Magazine of Concrete Research, Thomas Telford, Volume 63, Issue 9, pp 689-705, September, 2011.
- [17] FARIA, D., INÁCIO, M., LÚCIO, V. e RAMOS, A. - *Punching of Strengthened Concrete Slabs – Experimental Analysis and Comparison with Codes*, IABSE, Structural Engineering International, No. 2 – “Codes of Practice in Structural Engineering”, Maio 2012.
- [18] GOMES, J. e RAMOS, A. P. - *Punçamento em Lajes Fungiformes Reforçadas com Parafusos Transversais Aderentes (Parte 1)*. Revista Internacional Construlink, Nº 30, Junho de 2012, Vol. 10, 23-33.
- [19] GOMES, J. e RAMOS, A. P. - *Punçamento em Lajes Fungiformes Reforçadas com Parafusos Transversais Aderentes (Parte 2)*. Revista Internacional Construlink, Nº 30, Junho de 2012, Vol. 10, 34-43
- [20] FARIA, D., LÚCIO, V., e RAMOS, A., *Post-Punching Behaviour of Flat Slabs Strengthened with a New Technique using Post-Tensioning*, Engineering Structures, Volume 40, Julho 2012, pp 382-397.
- [21] MAMEDE, N., RAMOS, A. e FARIA, D. - *Análise do efeito de características mecânicas e geométricas que afetam o comportamento ao Punçamento de lajes fungiformes*, Encontro Nacional Betão Estrutural 2012, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Outubro de 2012.
- [22] FARIA, D.; LÚCIO, V. e RAMOS, A. - *Reforço de lajes com recurso a pós-tensão com ancoragens por aderência*, Encontro Nacional Betão Estrutural 2012, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Outubro de 2012.

- [23] INÁCIO, M.; RAMOS, A.; LÚCIO, V. e FARIA, D. - *Punçoamento de lajes fungiformes reforçadas com parafusos – efeito da área e posicionamento da ancoragem*, Encontro Nacional Betão Estrutural 2012, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Outubro de 2012.
- [24] INÁCIO, M.; RAMOS, A.; FARIA, D. – *Strengthening of flat slabs with transverse reinforcement by introduction of steel bolts using different anchorage approaches*. Engineering and Structures, Volume 44, Novembro 2012, págs. 63-77.
- [25] CLÉMENT, T., RAMOS, A. P., FERNÁNDEZ RUIZ, M. e MUTTONI, A. - *Design for punching of prestressed concrete slabs*. Structural Concrete, 14: 157–167. 2013.
- [26] MAMEDE, N.; RAMOS, A., FARIA, D. – *Experimental and parametric 3D nonlinear finite element analysis on punching of flat slabs with orthogonal reinforcement*. Engineering and Structures, Volume 48, Março 2013, p. 442-457.
- [27] INÁCIO, M.; RAMOS, A., LÚCIO, V. e FARIA, D. - *Punching of High Strength Concrete Flat Slabs - Experimental Investigation*, Proceedings of fib symposium Tel Aviv 2013, 4p, Tel Aviv, Abril de 2013.
- [28] FARIA, D.; LÚCIO, V. e RAMOS, A. - *Development of a Design Proposal for a Slab Strengthening System using Prestress with Anchorages by Bonding*, Proceedings of fib symposium Tel Aviv 2013, Tel Aviv, Abril 2013.
- [29] GOUVEIA, N.; FERNANDES, N., FARIA, D.; RAMOS A. e LÚCIO, V. - *Punching of Steel Fibre Reinforcement Concrete Flat Slabs*, Proceedings of fib symposium Tel Aviv 2013, Tel Aviv, Abril, 2013.
- [30] SILVA, R.; FARIA, D.; RAMOS, A.; INÁCIO, M. - *A physical approach for considering the anchorage head size influence in the punching capacity of slabs strengthened with vertical steel bolts*, Structural Concrete, Junho, 2013.
- [31] Nuno D. Gouveia, Nelson A.G. Fernandes, Duarte M.V. Faria, António M.P. Ramos, Válder J.G. Lúcio, *SFRC flat slabs punching behaviour – Experimental research*, Composites Part B: Engineering, Volume 63, July 2014, Pages 161-171, ISSN 1359-8368, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.04.005>.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836814001486>)

- [32] Thibault Clément, António Pinho Ramos, Miguel Fernández Ruiz, Aurelio Muttoni, *Influence of prestressing on the punching strength of post-tensioned slabs*, Engineering Structures, Volume 72, 1 August 2014, Pages 56-69, ISSN 0141-0296, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.04.034>.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029614002478>)

- [33] A. Pinho Ramos, Válder J.G. Lúcio, Duarte M.V. Faria, *The effect of the vertical component of prestress forces on the punching strength of flat slabs*, Engineering Structures, Volume 76, 1 October 2014, Pages 90-98, ISSN 0141-0296, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.06.039>.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029614003952>)

- [34] Duarte M. V. Faria, Jürgen Einpaul, António M. P. Ramos, Miguel Fernández Ruiz, Aurelio Muttoni, *On the efficiency of flat slabs strengthening against punching using externally bonded fibre reinforced polymers*, Construction and Building Materials, Volume 73, 30 December 2014, Pages 366-377, ISSN 0950-0618, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.084>.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814011003>)

- [35] Micael M.G. Inácio, André F.O. Almeida, Duarte M.V. Faria, Válder J.G. Lúcio, António Pinho Ramos, *Punching of high strength concrete flat slabs without shear reinforcement*, Engineering Structures, Volume 103, 15 November 2015, Pages 275-284, ISSN 0141-0296, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.09.010>.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029615005738>)

- [36] Gouveia, N.D., Faria, D.M.V. e Ramos, A. M. P. *Punçoamento em lajes de betão com fibras de aço*. Revista Internacional tech ITT, N° 34, Outubro de 2013, Vol. 11, 22-31.

- [37] Válder Lúcio, Duarte Faria, António Ramos e João Ferreira, *Reabilitação Estrutural de Edifícios com Pós-Tensão*, REHABEND 2014, Santander, Espanha, April 2014, pp 1591-1599, DOI: 10.13140/2.1.2334.0807.



- [38] Nuno Gouveia, Ana Luísa Custódio, Duarte Faria, António Ramos, *A Minimization Procedure for the Determination of SFRC Tensile Behaviour*, EngOpt 2014, 4<sup>th</sup> International Conference on Engineering Optimization, Lisbon, September 2014, DOI: 10.13140/2.1.1416.5767.
- [39] André Almeida, Micael Inácio, Válter Lúcio and António Ramos, *Flat Slab Punching Behaviour under Cyclic Horizontal Loading*, Short Paper, Proceedings of fib symposium Copenhagen 2015, Concrete – Innovation and Design, 2p, Copenhagen, Denmark, May 2015.
- [40] Gouveia, N.D., Custódia, A.L., Faria, D.M., Ramos, A.P. *Determinação de Relações Tensão-Abertura de Fendas de BRFA através de Análise Inversa*, 9º Congresso Nacional de Mecânica Experimental, Aveiro, Outubro de 2014.
- [41] André Almeida, Micael Inácio, Válter Lúcio e António Ramos. *Punçoamento em Lajes Fungiformes Sujeitas a Ações Cíclicas horizontais – Estudo Experimental*, 5<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Encontro Nacional de Betão Estrutural 2014, 9º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, Lisboa, Novembro, 2014.
- [42] Elaine Albuquerque, Guilherme Melo, António Ramos e Válter Lúcio. *Estudo Teórico-Experimental da Resistência ao Punçoamento de Lajes Fungiformes de Betão Aramado com Pilar de Canto Reentrante sem Armadura de Punçoamento*, 5<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Encontro Nacional de Betão Estrutural 2014, 9º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, Lisboa, Novembro, 2014.
- [43] Nuno Mamede, Duarte Faria e António Ramos. *Análise Numérica do Punçoamento em Lajes Fungiformes Pré-Esforçadas*, 5<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Encontro Nacional de Betão Estrutural 2014, 9º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, Lisboa, Novembro, 2014.
- [44] Micael Inácio, Duarte Faria, Válter Lúcio e António Ramos. *Punçoamento em Lajes Fungiformes de Betão de Elevada Resistência – Estudo Experimental*, 5<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Encontro Nacional de Betão Estrutural 2014, 9º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, Lisboa, Novembro, 2014.