

CONFERÊNCIA

Novas abordagens sobre a temática do punçoamento em lajes fungiformes

31 JANEIRO | 18H00

 Auditório Ordem dos Engenheiros

 Com transmissão online



ORDEM
DOS ENGENHEIROS
REGIÃO SUL



CONFERÊNCIA

Novas abordagens sobre a temática do punçoamento em lajes fungiformes



ORDEM
DOS ENGENHEIROS
REGIÃO SUL



ANO OE
ENERGIA E
CLIMA

Utilização de betões com propriedades melhoradas em lajes fungiformes

Carla Marchão
Professora Auxiliar
NOVA School of Science & Technology
Portugal

Lisboa, 31 de Janeiro de 2023

CONFERÊNCIA

Novas abordagens sobre a temática do punçoamento em lajes fungiformes



ORDEM
DOS ENGENHEIROS
REGIÃO SUL



ANO OE
ENERGIA E
CLIMA

Motivação

- As lajes fungiformes quando sujeitas a ações sísmicas apresentam frequentemente um comportamento frágil ao punçoamento.
- De modo a se obterem estruturas mais resistentes e com maior capacidade de deformação, várias soluções foram desenvolvidas e ensaiadas (estribos, conectores, armadura pós-instalada).
- A introdução de armaduras numa zona da laje onde tipicamente existe uma grande densidade de armaduras pode não ser fácil e levar a uma execução deficiente. Por outro lado, os conectores são uma solução ainda dispendiosa, podendo levar à sua rejeição por motivos económicos.
- Se não tivermos em conta as opções em que se altera a geometria da estrutura, a outra opção será melhorar as características mecânicas dos materiais, nomeadamente do betão.

CONFERÊNCIA

Novas abordagens sobre a temática do punçoamento em lajes fungiformes

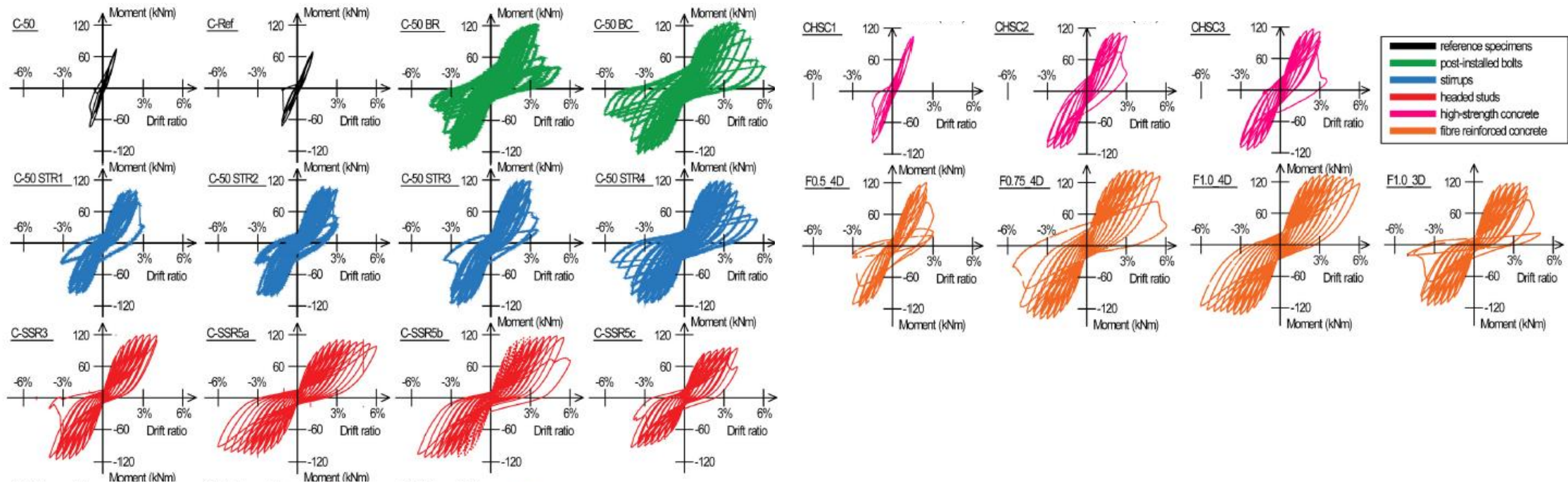


ORDEM
DOS ENGENHEIROS
REGIÃO SUL



ANO DE
ENERGIA E
CLIMA

Motivação



CONFERÊNCIA

Novas abordagens sobre a temática do punçoamento em lajes fungiformes



ORDEM
DOS ENGENHEIROS
REGIÃO SUL



ANO OE
ENERGIA E
CLIMA

Introdução

Esta apresentação descreve um programa experimental com o objetivo de estudar o comportamento de ligações laje fungiforme-pilar com uma utilização racional de betão de elevado desempenho reforçado com fibras (BEDRF).

Com vista à otimização da utilização de BEDRF, os modelos experimentais foram projetados e produzidos utilizando o BEDRF numa zona limitada da laje, junto ao pilar, sendo na restante parte da laje utilizado um betão convencional.

Numa primeira fase, foram ensaiados cinco modelos, incluindo uma laje de referência totalmente de betão convencional, onde se fizeram variar a percentagem de armadura longitudinal (0,6% e 1,0%) e a dimensão da área betonada com BEDRF (1,5 a 3 vezes a altura útil da laje, medidos a partir da face do pilar).

Na segunda fase foram ensaiadas 4 lajes sujeitas a ações horizontais cíclicas, sob uma carga gravítica constante. Os parâmetros que variaram entre lajes foram a armadura longitudinal de flexão, a dimensão da zona de BEDRF a partir da face do pilar e o valor da carga gravítica.

CONFERÊNCIA

Novas abordagens sobre a temática do punçoamento em lajes fungiformes



ORDEM
DOS ENGENHEIROS
REGIÃO SUL



ANO OE
ENERGIA E
CLIMA

Descrição do BEDRF

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

- Mistura autocompactável
- Dois tipos de fibras de aço (mistura híbrida) com percentagem volumétrica $V_f = 1\%$ (fibras longas com 0,9 mm de diâmetro e 60 mm de comprimento e fibras retas com 0,2 mm de diâmetro e 13 mm de comprimento)
- Relação água / cimento de 28%
- Relação sílica fumo / cimento de 10%

CONFERÊNCIA

Novas abordagens sobre a temática do punçoamento em lajes fungiformes



ORDEM
DOS ENGENHEIROS
REGIÃO SUL



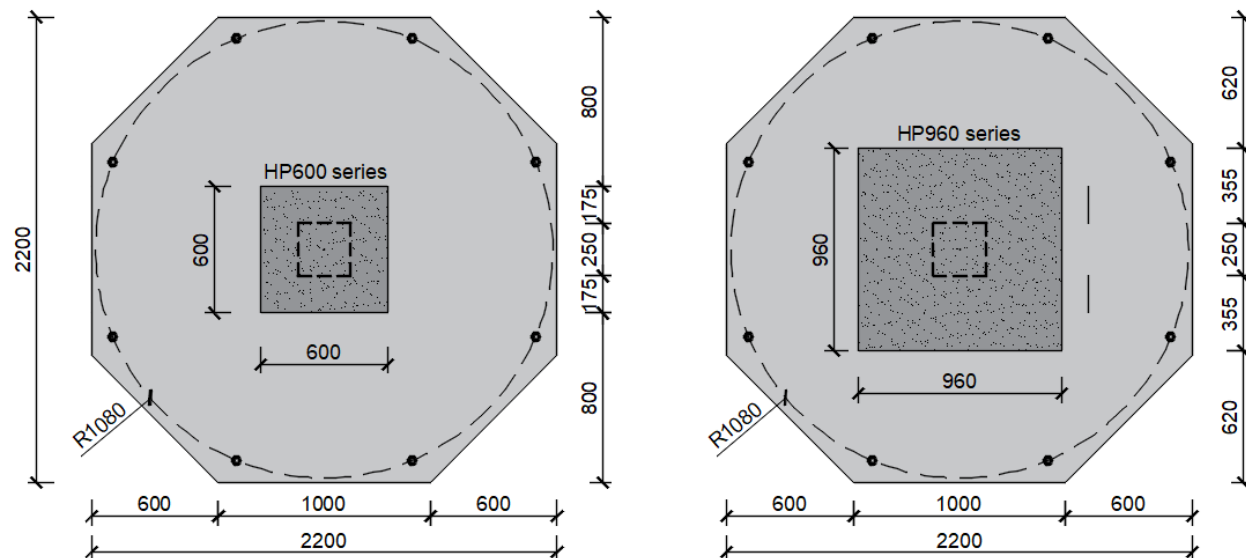
ANO OE
ENERGIA E
CLIMA

1ª Fase - Geometria

Cinco modelos com espessura de 150 mm e forma octogonal, com dimensões em planta máximas de 2200 mm por 2200 mm.

O BEDRF foi utilizado apenas numa zona limitada da laje, junto ao pilar, sendo o restante produzido com um betão convencional.

Pelo facto do BEDRF ser autocompactável, betonou-se primeiro o betão convencional. Foi necessária a utilização de uma malha fina de aço galvanizado na interface entre as duas zonas.



CONFERÊNCIA

Novas abordagens sobre a temática do punçoamento em lajes fungiformes

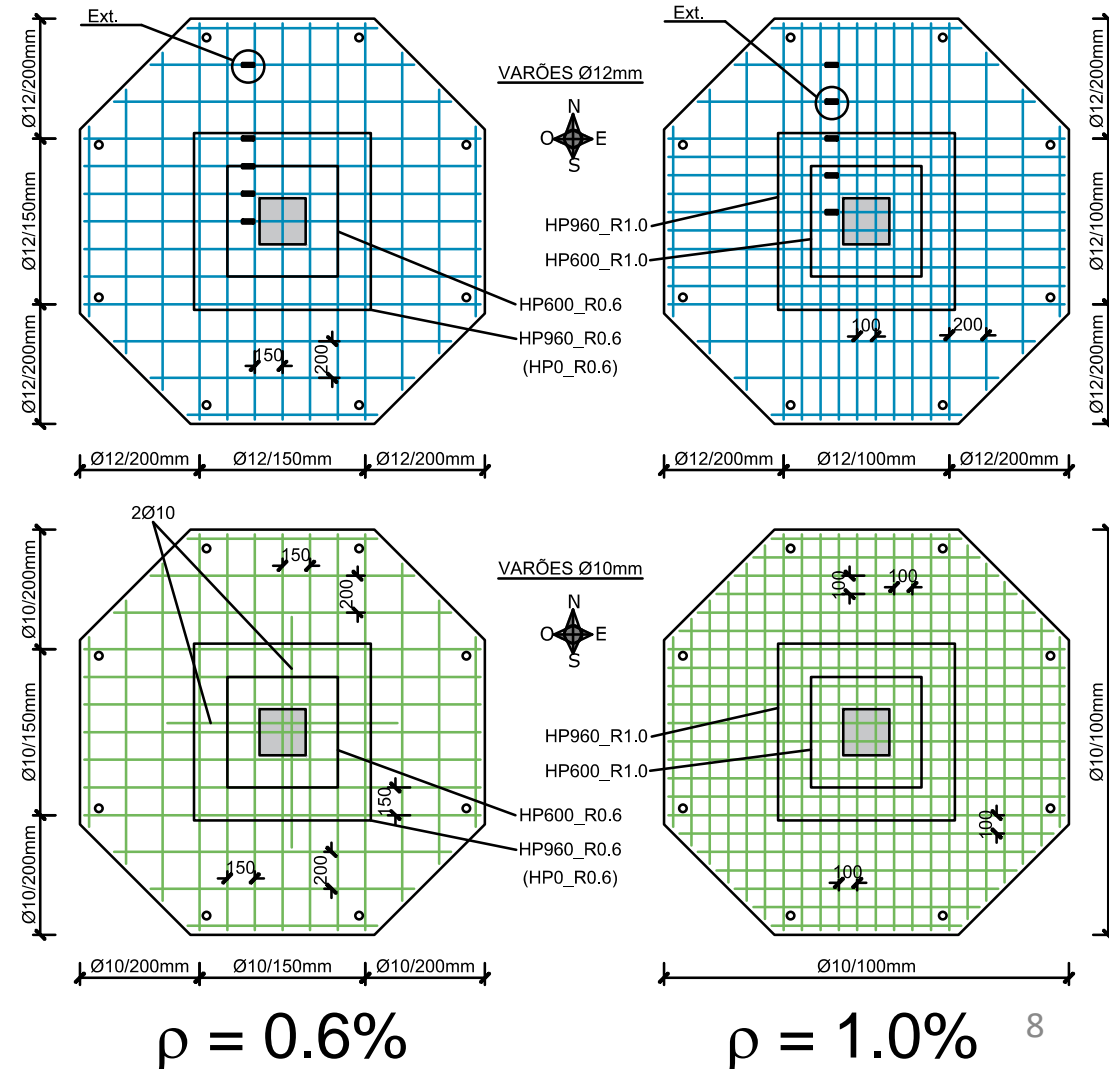


ORDEM
DOS ENGENHEIROS
REGIÃO SUL



ANO DE
ENERGIA E
CLIMA

1ª Fase – Armaduras de flexão



CONFERÊNCIA

Novas abordagens sobre a temática do punçoamento em lajes fungiformes



ORDEM
DOS ENGENHEIROS
REGIÃO SUL



ANO OE
ENERGIA E
CLIMA

1ª Fase – Características do betão dos modelos

Modelo	BC			BEDRF		
	f_c (MPa)	$f_{ct,sp}$ (MPa)	E (GPa)	$f_{c,cube100}$ (MPa)	f_c (MPa)	E (GPa)
HPO_R0.6	24.4	2.2	29.0	N/A	N/A	N/A
HP600_R0.6	27.5	2.2	29.5	N/A	126.1	51.5
HP960_R0.6	26.0	2.5	27.5	130.1	127.7	49.7
HP600_R1.0	24.6	2.2	25.1	126.6	123.9	49.3
HP960_R1.0	25.5	2.3	25.6	124.0	118.1	N/A

A mistura de BEDRF utilizada apresentava uma resistência à compressão de aproximadamente 125 MPa.

O betão convencional tinha uma resistência à compressão de aproximadamente 25 MPa.

CONFERÊNCIA

Novas abordagens sobre a temática do punçoamento em lajes fungiformes



ORDEM
DOS ENGENHEIROS
REGIÃO SUL



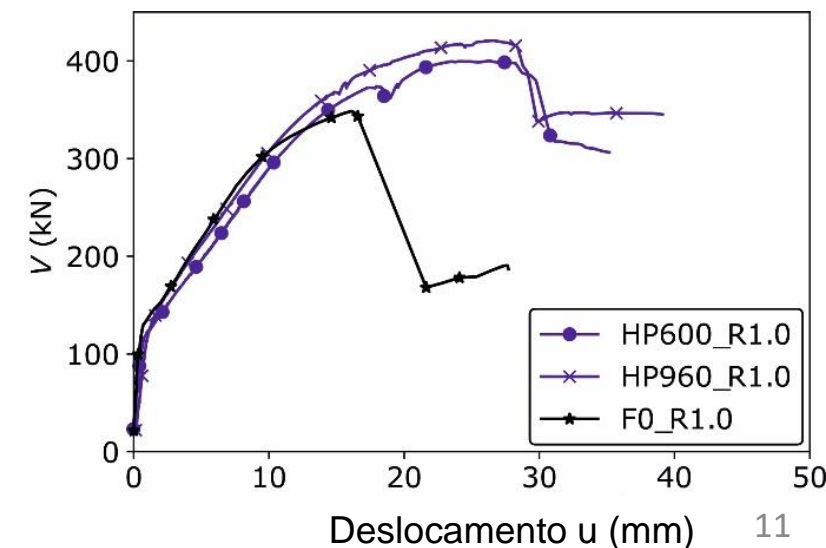
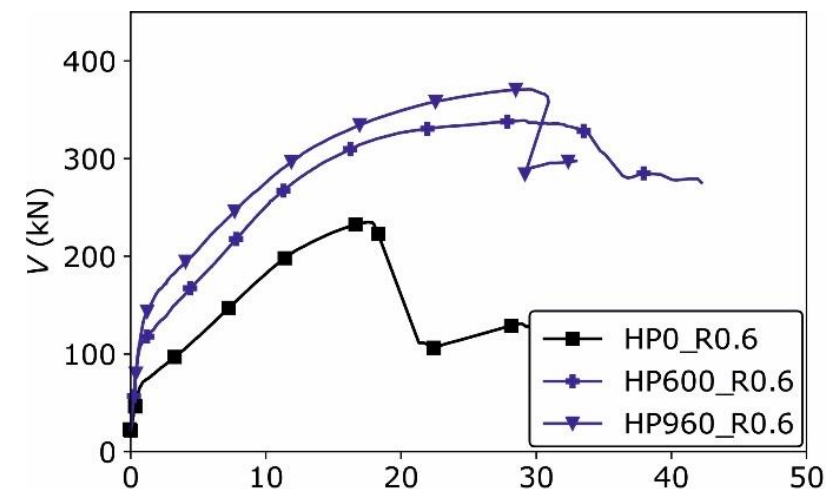
ANO OE
ENERGIA E
CLIMA

1ª Fase – Resultados experimentais

- **Curvas carga-deslocamento**

O BEDRF foi responsável por aumentar:

- a rigidez pós-fendilhação;
- a capacidade de carga;
- o deslocamento máximo.



CONFERÊNCIA

Novas abordagens sobre a temática do punçoamento em lajes fungiformes



ORDEM
DOS ENGENHEIROS
REGIÃO SUL



ANO OE
ENERGIA E
CLIMA

1ª Fase – Resultados experimentais

- Cargas e modos de rotura



HP0_R0.6



HP600_R0.6



HP960_R0.6



HP600_R1.0



HP960_R1.0

Modelo	V_{exp} (kN)	u_{max} (mm)	Modo de Rotura
HP0_R0.6	235.0	17.6	Punçoamento
HP600_R0.6	338.9 (+44%)	29.0	Combinação de corte fora do perímetro de BEDRF, com corte dentro do perímetro e flexão
HP960_R0.6	370.9 (+58%)	29.2	Corte dentro da zona de BEDRF (limitado por punçoamento num canto do modelo)
HP600_R1.0	399.9 (+70%)	26.4	Punçoamento fora da zona de BEDRF
HP960_R1.0	420.1 (+79%)	26.5	Corte unidirecional fora da zona de BEDRF

CONFERÊNCIA

Novas abordagens sobre a temática do punçoamento em lajes fungiformes



ORDEM
DOS ENGENHEIROS
REGIÃO SUL

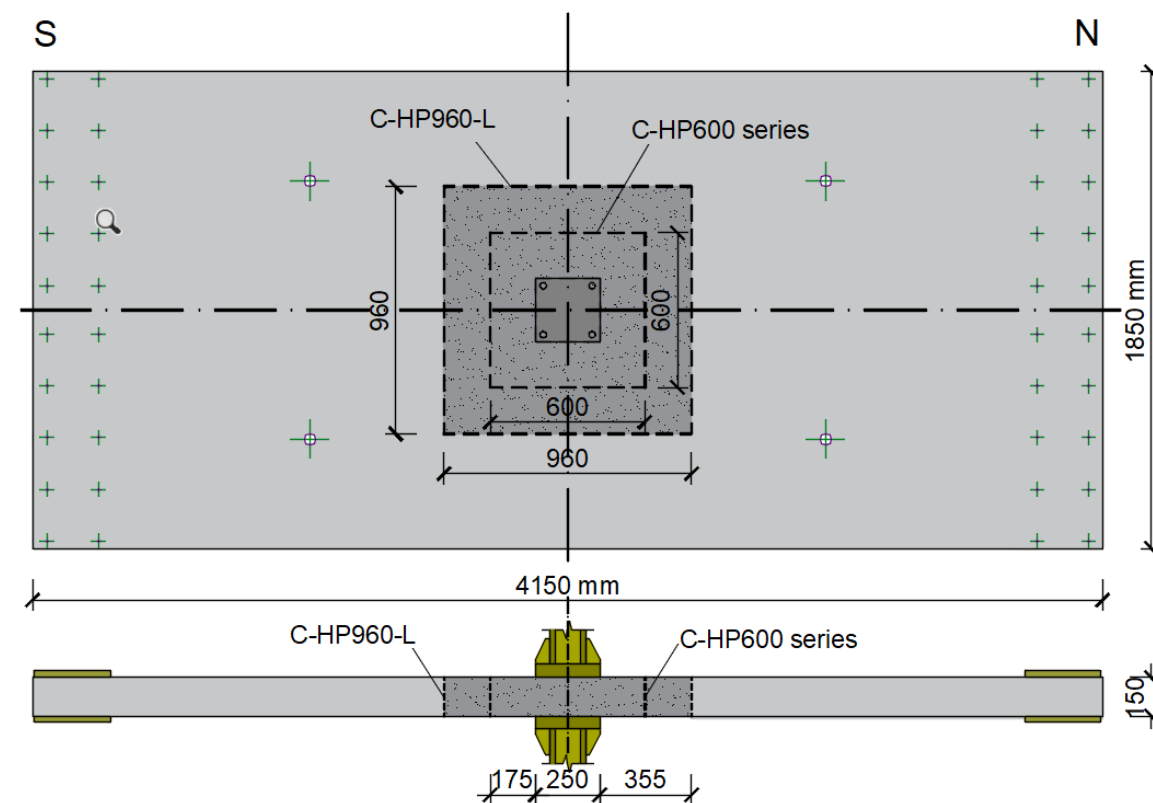
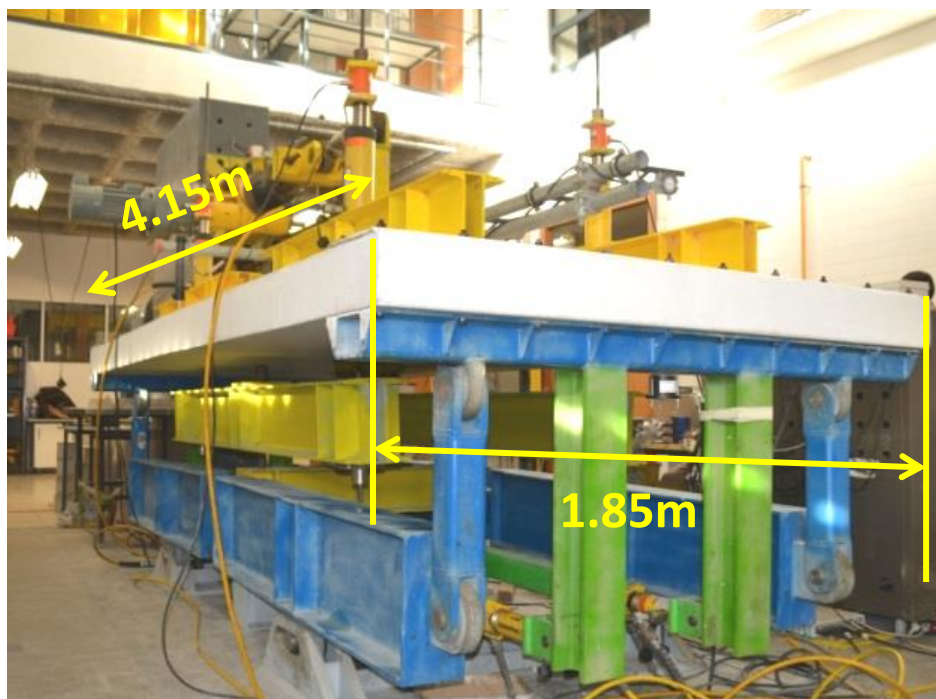


ANO DE
ENERGIA E
CLIMA

2ª Fase - Geometria

Espessura da laje: 150mm;

Dimensões do modelo: 4.15m x 1.85m



- ➔ Laje entre secções de meio vão na direcção de aplicação da acção horizontal (N-S) e entre secções de momento nulo na secção transversal (E-O)
- ➔ Zona junto ao pilar betonada com BEDRF (600 ou 960mm) 13

CONFERÊNCIA

Novas abordagens sobre a temática do punçoamento em lajes fungiformes

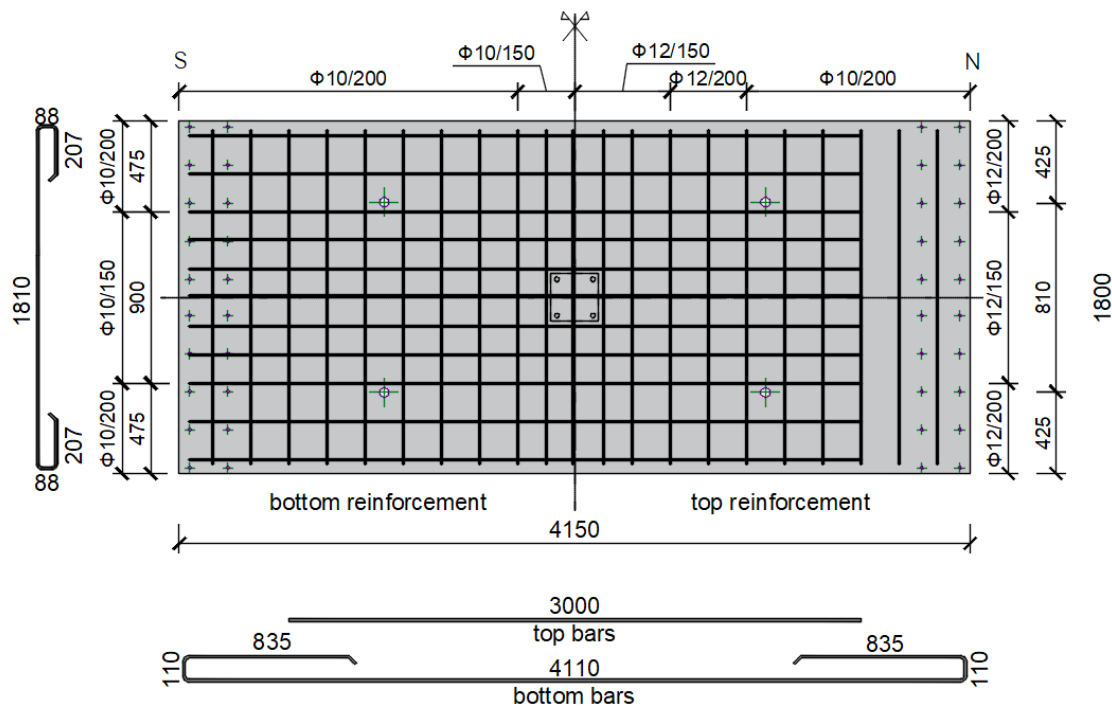


ORDEM
DOS ENGENHEIROS
REGIÃO SUL

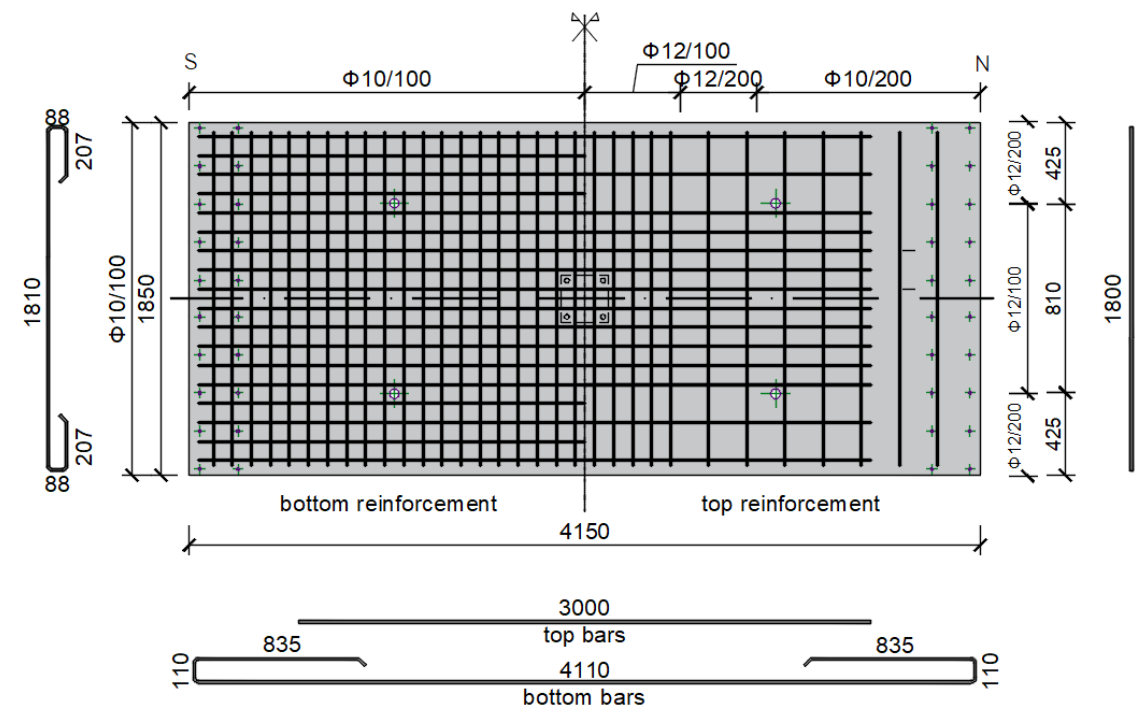


ANO OE
ENERGIA E
CLIMA

2ª Fase – Armaduras de flexão



$$\rho = 0.6\%$$



$$\rho = 1.0\%$$

CONFERÊNCIA

Novas abordagens sobre a temática do punçoamento em lajes fungiformes



ORDEM
DOS ENGENHEIROS
REGIÃO SUL



ANO OE
ENERGIA E
CLIMA

2ª Fase – Características principais dos modelos

Modelo	d (mm)	ρ (%)	V_g (kN)	V_0 (kN)	$GSR = V_g/V_0$
C-HP600-L	117.3	0.6	182.3	337.8	54%
C-HP960-L	117.8	0.6	178.0	333.0	53%
C-HP600-M	118.0	1.0	199.9	369.6	54%
C-HP600-M(g)	117.5	1.0	225.3	359.2	63%
C-Ref-L	117.3	0.6	165.2	284.2	58%
C50	118.0	1.0	203.4	397.9	51%

CONFERÊNCIA

Novas abordagens sobre a temática do punçoamento em lajes fungiformes



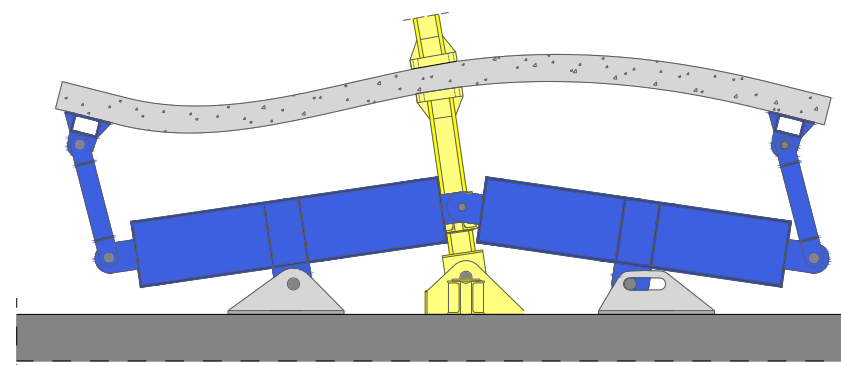
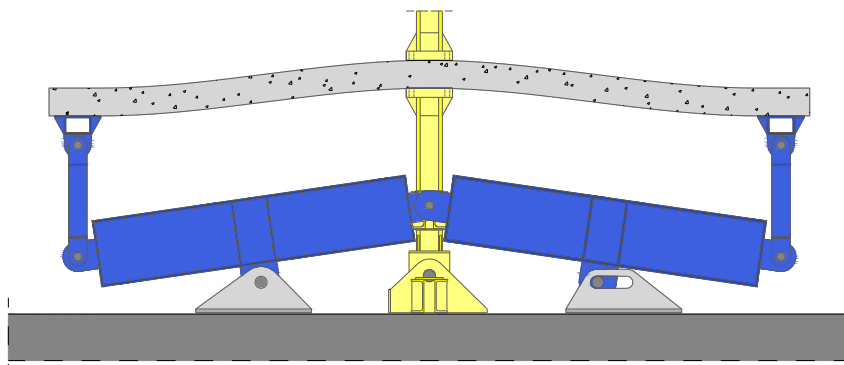
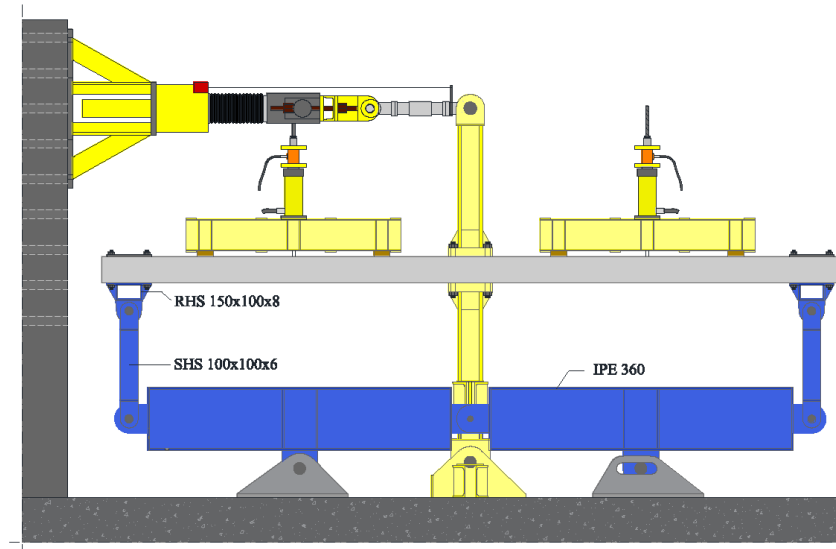
ORDEM
DOS ENGENHEIROS
REGIÃO SUL



ANO OE
ENERGIA E
CLIMA

2ª Fase – Sistema de ensaio

Sistema de compatibilização dos deslocamentos verticais e das forças de corte nos bordos mais afastados (4 elementos em baloiço)



CONFERÊNCIA

Novas abordagens sobre a temática do punçoamento em lajes fungiformes



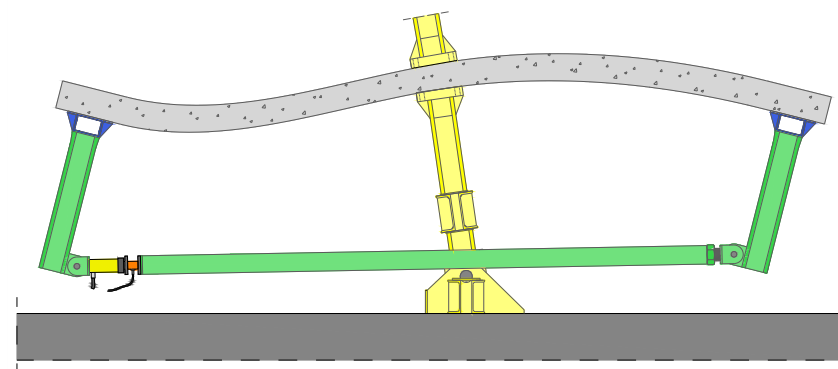
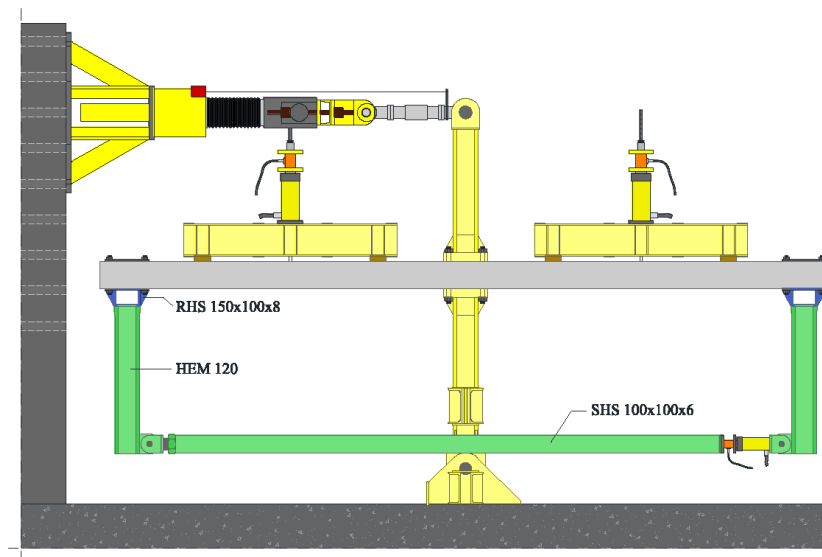
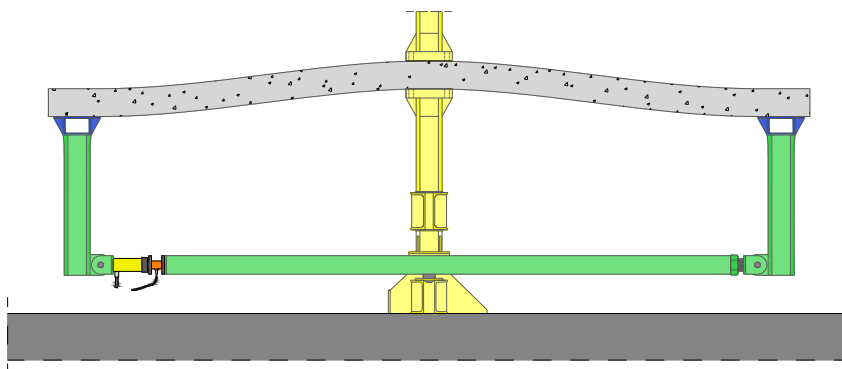
ORDEM
DOS ENGENHEIROS
REGIÃO SUL



ANO OE
ENERGIA E
CLIMA

2ª Fase – Sistema de ensaio

Sistema de compatibilização das rotações e dos momentos fletores nos bordos mais afastados (duas escoras bi-articuladas)



CONFERÊNCIA

Novas abordagens sobre a temática do punçoamento em lajes fungiformes

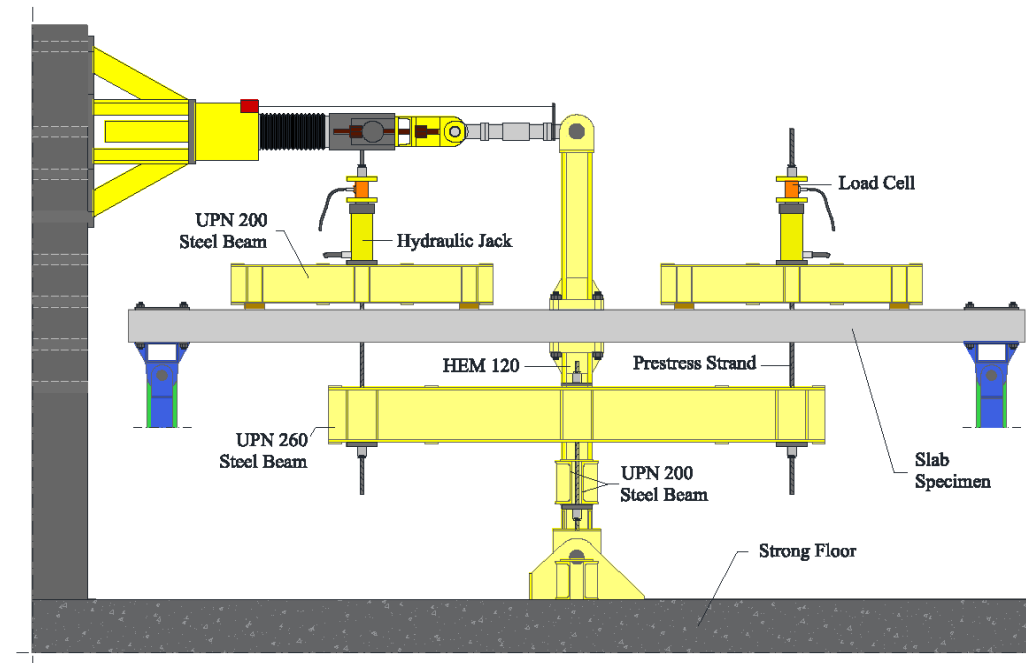


ORDEM
DOS ENGENHEIROS
REGIÃO SUL



ANO DE
ENERGIA E
CLIMA

2ª Fase – Sistema de ensaio



Cargas verticais aplicadas através da utilização de vigas de distribuição formando uma estrutura fechada movendo-se com o modelo

CONFERÊNCIA

Novas abordagens sobre a temática do punçoamento em lajes fungiformes



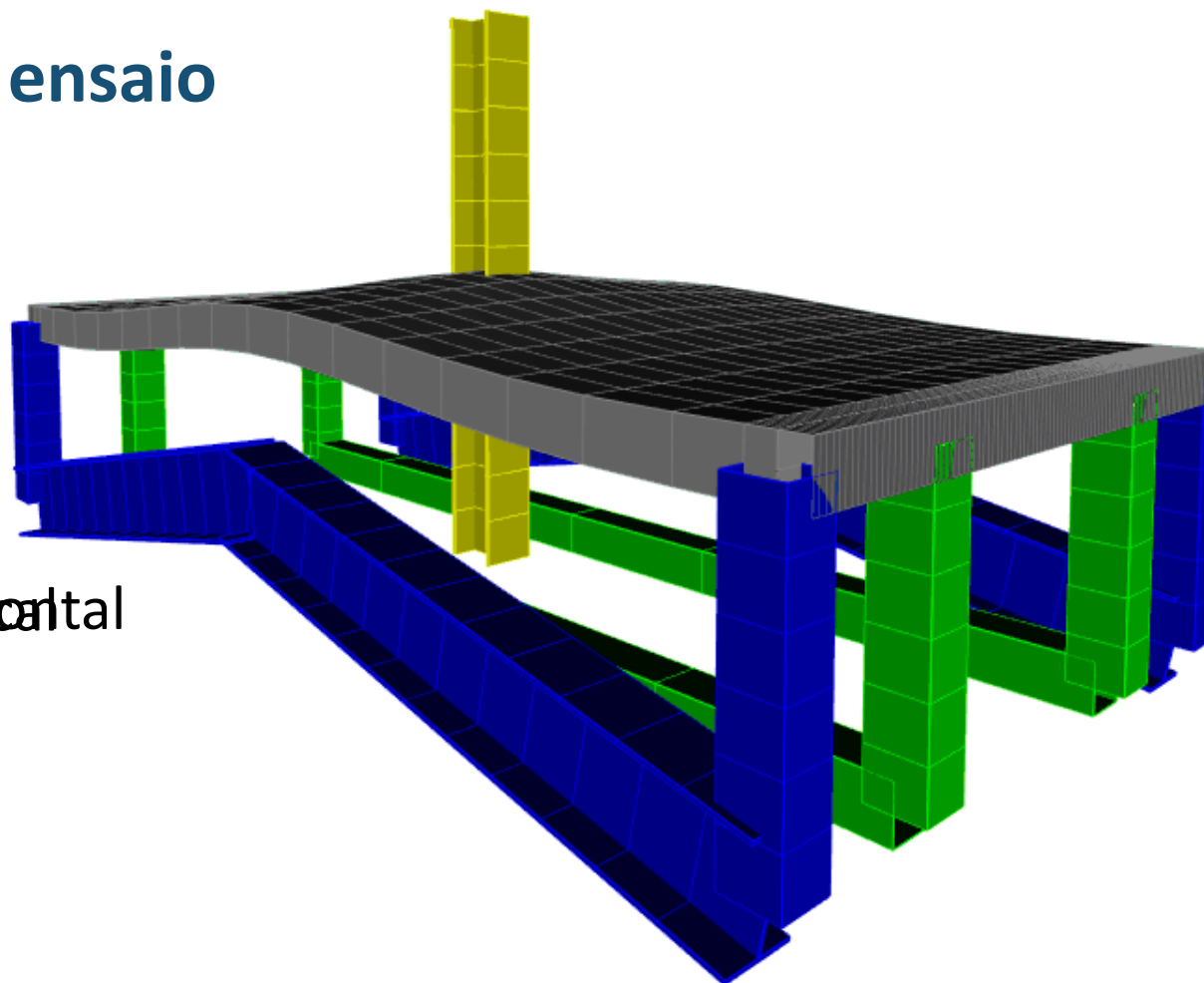
ORDEM
DOS ENGENHEIROS
REGIÃO SUL



ANO OE
ENERGI.
CLIMA

2ª Fase – Sistema de ensaio

Carregamento horizontal



CONFERÊNCIA

Novas abordagens sobre a temática do punçoamento em lajes fungiformes



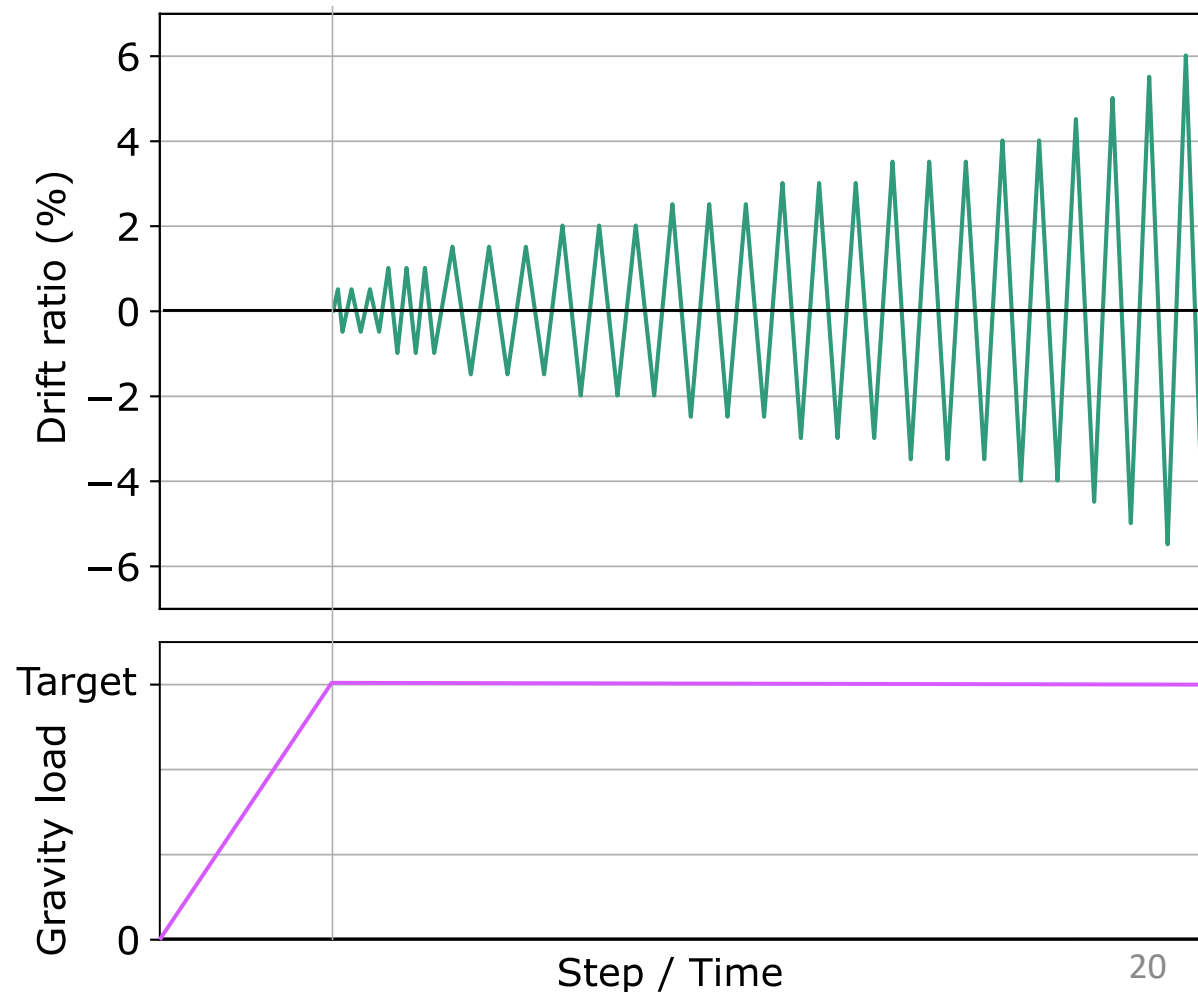
ORDEM
DOS ENGENHEIROS
REGIÃO SUL



ANO OE
ENERGI.
CLIMA

2ª Fase – Protocolo de ensaio

- Aplicação da carga gravítica até ao valor pré-definido.
- Aplicação de ciclos de deslocamento relativo horizontal crescentes até à rotura.
- O fim do ensaio é alcançado quando a carga horizontal máxima num determinado ciclo é 20% inferior em relação ao valor máximo alcançado em ciclos anteriores ou quando se alcança um drift de 6,0%.



CONFERÊNCIA

Novas abordagens sobre a temática do punçoamento em lajes fungiformes



ORDEM
DOS ENGENHEIROS
REGIÃO SUL



ANO OE
ENERGIA E
CLIMA

2ª Fase – Características do betão dos modelos

Modelo	BC		BEDRF	
	$f_{c,cubo}$ (MPa)	f_c (MPa)	$f_{c,cube100}$ (MPa)	f_c (MPa)
C-HP600-L	53,8	52,5	114,2	116,7
C-HP960-L	49,5	49,5	106,1	101,0
C-HP600-M	46,5	44,8	126,3	114,7
C-HP600-M(g)	39,1	41,9	129,9	120,1
C-Ref-L	40,1	31,3	-	-
C50	48,6	52,4	-	-

CONFERÊNCIA

Novas abordagens sobre a temática do punçoamento em lajes fungiformes



ORDEM
DOS ENGENHEIROS
REGIÃO SUL



ANO OE
ENERGI.
CLIMA

2ª Fase – Resultados experimentais

Actualmente, os Eurocódigos não permitem que uma laje fungiforme seja um elemento principal para resistir às ações sísmicas, devendo ter a capacidade de acompanhar os deslocamentos horizontais impostos sem colapsar e garantindo a capacidade de transmissão das cargas gravíticas para os pilares

➡ o principal parâmetro a analisar nestes resultados é o deslocamento horizontal.

CONFERÊNCIA

Novas abordagens sobre a temática do punçoamento em lajes fungiformes



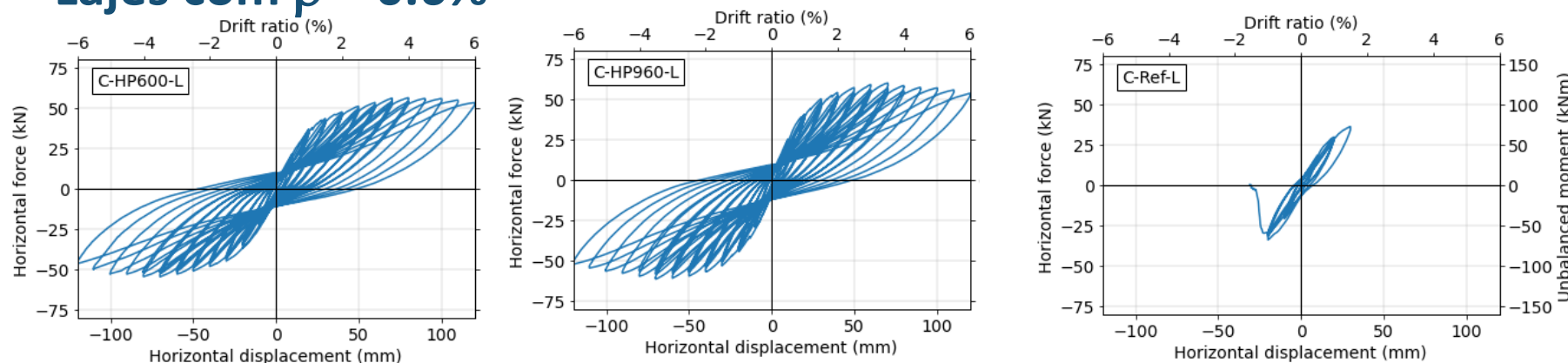
ORDEM
DOS ENGENHEIROS
REGIÃO SUL



ANO OE
ENERGI,
CLIMA

2ª Fase – Resultados experimentais

- Lajes com $\rho = 0.6\%$

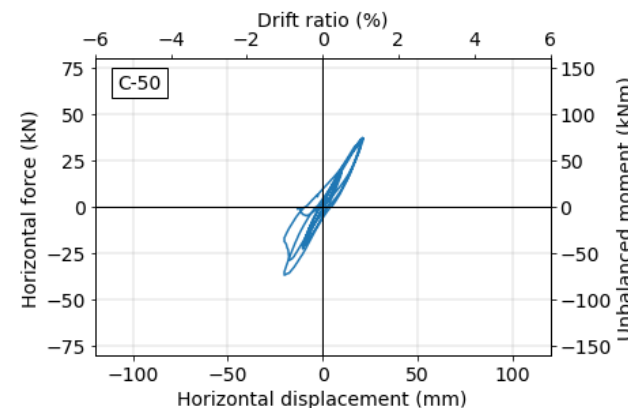
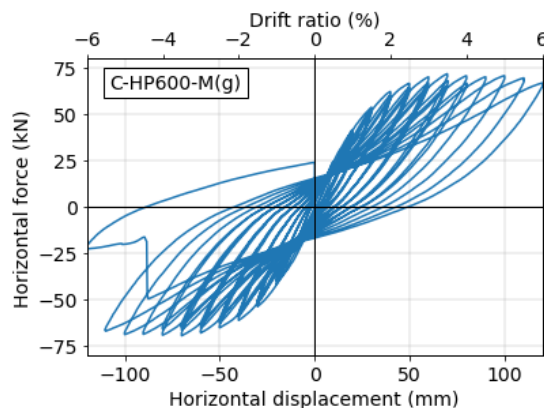
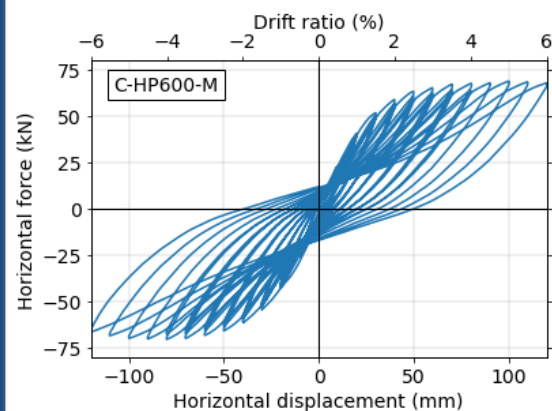


Modelo	GSR	f_c (MPa)	$d_{r,y}$ (%)	$F_{H,max}$ (kN)	$d_{r,u}$ (%)
C-Ref-L	58%	31.3	N/A	36.4	1.0
C-HP600-L	54%	52.5	2.0	56.4	>6.0
C-HP960-L	53%	49.5	1.8	61.5	>6.0

- As lajes feitas com BEDRF alcançaram o fim do protocolo (limite do Sistema de ensaio) sem rotura;
- Aumento do *drift* máximo de 1% (modelos de referência) para >6%;
- Aumento de 55-69% da força horizontal máxima,

2ª Fase – Resultados experimentais

- Lajes com $\rho = 1.0\%$



Modelo	GSR	f_c (MPa)	$d_{r,y}$ (%)	$F_{H,max}$ (kN)	$d_{r,u}$ (%)
C-50	52%	52.4	N/A	37.4	1.0
C-HP600-M	54%	44.8	2.2	70.5	>6.0
C-HP600-M(g)	63%	41.9	2.1	71.9	5.5

- Aumento do drift máximo de 1% (modelo de referência) para >6% (GSR=54%) e 5.5% (GSR=63%);
- Aumento de 88-92% na força horizontal máxima.



BRISID ISUFI
Slab 1
6th October 2016
FCT-UNL

06 October 2016

CONFERÊNCIA

Novas abordagens sobre a temática do punçoamento em lajes fungiformes



ORDEM
DOS ENGENHEIROS
REGIÃO SUL



ANO OE
ENERGIA E
CLIMA

Conclusões

- **1ª Fase**

A utilização de BEDRF com resistência à compressão de, aproximadamente, 125 MPa e percentagem volumétrica de 1% de fibras aplicado em pelo menos 1,5d da face da coluna foi suficiente para aumentar significativamente a capacidade de carga dos modelos (cerca de 44% para o modelo HP600_R0.6, em comparação com o modelo de referência HP0_R0.6)

A utilização de BEDRF resultou com sucesso no aumento da capacidade de carga para ambas as percentagens de armadura de flexão consideradas neste trabalho de investigação: 0,6% e 1,0%.

CONFERÊNCIA

Novas abordagens sobre a temática do punçoamento em lajes fungiformes



ORDEM
DOS ENGENHEIROS
REGIÃO SUL



ANO OE
ENERGIA E
CLIMA

Conclusões

- **1ª Fase**

Além de aumentar a capacidade de carga, o BEDRF retardou o início da fendilhação dos modelos. A solução utilizada neste trabalho é, portanto, também benéfica para o dimensionamento ao Estado Limite de Serviço de lajes fungiformes, embora o BEDRF tenha sido aplicado apenas numa região limitada próxima do pilar de apoio.

CONFERÊNCIA

Novas abordagens sobre a temática do punçoamento em lajes fungiformes



ORDEM
DOS ENGENHEIROS
REGIÃO SUL



ANO OE
ENERGIA E
CLIMA

Conclusões

- **2ª Fase**

Os modelos com BEDRF tiveram um comportamento excelente. Todos os modelos conseguiram alcançar um *drift* de pelo menos 5.5% sem perda significativa de momento desequilibrado, sendo capazes de suportar as cargas gravíticas. O único modelo que atingiu a rotura por punçoamento antes do fim do protocolo foi o modelo onde se aumentou a carga gravítica (modelo C-HP600-M(g)). De notar que os modelos de referência (sem BEDRF) romperam para *drifts* de cerca de 1%.

Mesmo nos modelos onde foi utilizado BEDRF numa pequena zona, até cerca de 1.5d a partir da face do pilar, foi possível alcançar *drifts* elevados.

CONFERÊNCIA

Novas abordagens sobre a temática do punçoamento em lajes fungiformes



ORDEM
DOS ENGENHEIROS
REGIÃO SUL



ANO OE
ENERGIA E
CLIMA

Conclusões

- **2ª Fase**

A utilização de BEDRF influenciou ainda a capacidade de transferir momento desequilibrado nas ligações laje-pilar. Mesmo nos modelos onde foi utilizado BEDRF numa pequena zona (600 mm), a resistência à flexão das lajes aumentou significativamente, resultando em maiores momentos desequilibrados.

CONFERÊNCIA

Novas abordagens sobre a temática do punçoamento em lajes fungiformes



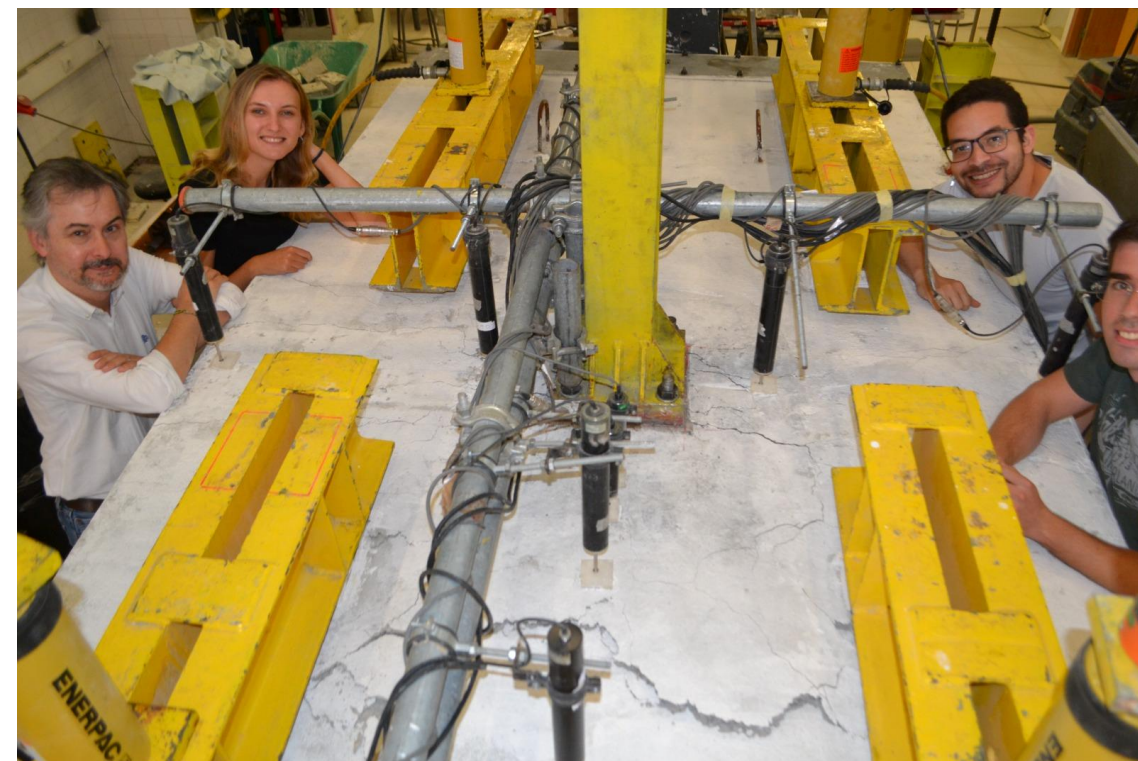
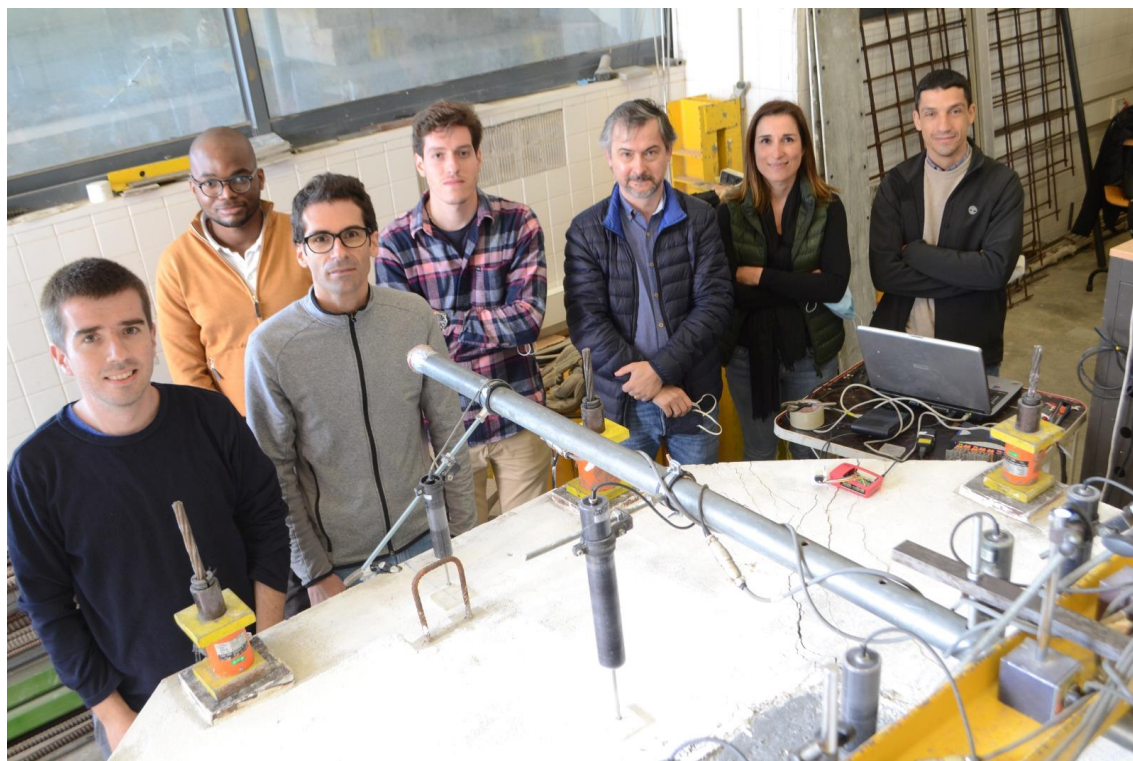
ORDEM
DOS ENGENHEIROS
REGIÃO SUL



ANO OE
ENERGIA E
CLIMA

Elementos da equipa

António Pinho Ramos, Carla Marchão, Rui Marreiros, Brisid Isufi



CONFERÊNCIA

Novas abordagens sobre a temática do punçoamento em lajes fungiformes



ORDEM
DOS ENGENHEIROS
REGIÃO SUL



ANO OE
ENERGIA E
CLIMA

Obrigada!