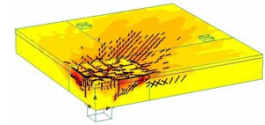


O **Punçoamento** é um dos fenómenos de maior complexidade que pode ocorrer em lajes fungiformes de betão armado, uma vez que ocorre em zonas de descontinuidade geométrica onde elevadas tensões se concentram numa pequena área dos elementos.



## 1. Objetivos:

- Modelação numérica de lajes ensaiadas em laboratório para validação dos modelos numéricos;
- Estudo da Influência de vários parâmetros no comportamento e resistência ao punçoamento: **espessura da laje; percentagem de armadura longitudinal, classe de resistência do betão e dimensão transversal do pilar;**
- Comparação dos resultados obtidos numericamente com as normas EC2 e MC2010;
- Proposta de alteração na equação de previsão da resistência ao punçoamento presente no EC2.

## 2. Software Atena 3D:

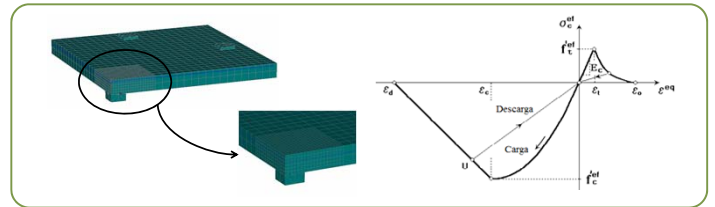
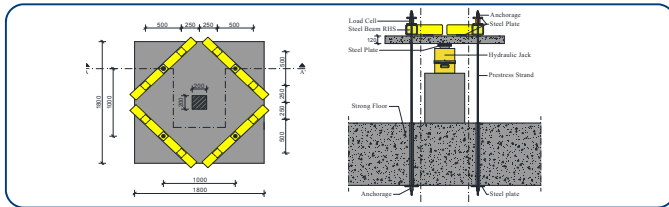
### Betão:

- Simulado segundo o diagrama tensão-deformação uniaxial reduzido a partir do estado biaxial de tensões do betão;
- O modelo de fendilhação baseou-se numa combinação entre o "rotated crack model" e o "fixed crack model", sendo o betão simulado através de elementos do tipo brick (8 nós).

### Aço:

- Admitido com comportamento bilinear, através de elementos barra e com modelo de aderência armadura-betão do tipo "Perfect Bond".

Método **Newton-Raphson** foi utilizado como processo iterativo de cálculo das soluções.



## 3. Benchmark - Calibração:

### Modelos experimentais:

- Quadrados em planta e limitados pela zona de momentos nulos;
- Armadura longitudinal ortogonal superior e inferior;
- Materiais caracterizados através de ensaios experimentais.

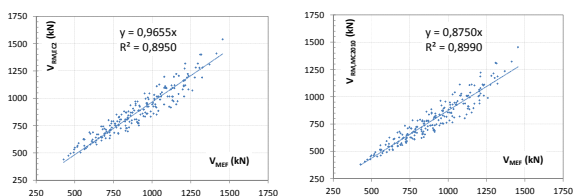
### Modelos numéricos:

- Modelação de apenas 1/4 de laje de forma a simplificar os cálculos e a aproveitar a simetria, aplicação de encastramentos de forma a garantir condições de fronteira;
- Suportes e pilar simulados com placas de aço e carregamento aplicado por prescrição de deslocamento;
- Refinamento da malha junto ao pilar para se obter melhor convergência nas soluções e por consequente em toda a análise realizada.

## 4. Análise Paramétrica:

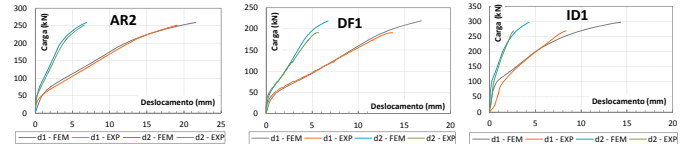
- Foram desenvolvidos 216 Modelos numéricos;
- As dimensões dos modelos foram definidas segundo a esbelteza considerada para lajes fungiformes:  $h=L/30$ ;
- Limitados pela zona dos momentos nulos  $\approx 0.22L$ ;
- As armaduras longitudinais superior e inferior foram definidas segundo a percentagem de armadura do modelo e a armadura mínima segundo o EC2, respetivamente.

### 4.2. Comparação das cargas de rotura com os regulamentos (EC2 e MC2010):



	$\mu$	$\sigma$	COV
$V_{MEF}/V_{RM,EC2}$	1,03	0,081	0,078
$V_{MEF}/V_{RM,MC2010}$	1,14	0,090	0,079

### 3.1. Comportamento força-deslocamento



### 3.2. Comparação das cargas de rotura

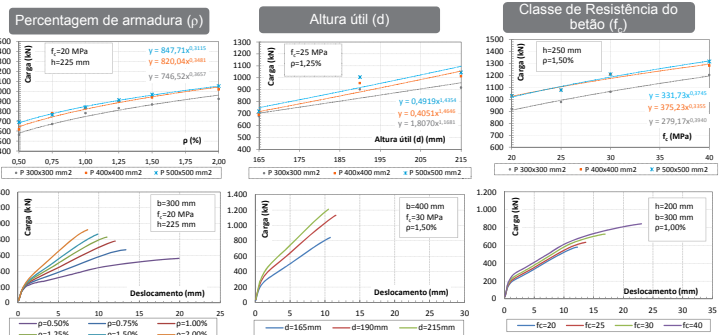
Modelo	$V_{EXP}$ (kN)	$V_{MEF}$ (kN)	$V_{RM,EC2}$ (kN)	$V_{RM,MC2010}$ (kN)	$V_{EXP}/V_{MEF}$ (kN)	$V_{RM,EC2}/V_{MEF}$ (kN)	$V_{RM,MC2010}/V_{MEF}$ (kN)
AR2	258,0	259,1	268,4	221,1	1,00	1,03	0,85
AR9	251,0	260,6	263,7	215,5	0,96	1,01	0,83
DF1	191,0	218,9	202,0	156,0	0,87	0,96	0,74
DF4	199,0	210,0	217,0	180,1	0,95	1,02	0,85
ID1	269,0	297,4	270,9	222,4	0,90	0,91	0,75

$$\frac{V_{EXP}}{V_{MEF}} = 0.94$$

$$\frac{V_{RM,EC2}}{V_{MEF}} = 0.99$$

$$\frac{V_{RM,MC2010}}{V_{MEF}} = 0.81$$

### 4.1. Influência dos parâmetros na resistência ao punçoamento:



### 4.3. Equação para previsão da capacidade resistente ao punçoamento proposta:

$$V_{Prop.} = 0.4 \cdot \left(\frac{G_f}{d}\right)^{0.15} \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_c)^{1/3} \cdot u_1 \cdot d$$

Comparação com vários resultados experimentais:

	$\mu$	$\sigma$	COV	Percentil 5%
$V_{EXP}/V_{RM,EC2}$	0,98	0,12	0,12	0,79
$V_{EXP}/V_{RM,MC2010}$	1,12	0,16	0,14	0,88
$V_{EXP}/V_{Prop.}$	1,06	0,13	0,13	0,89

**Agradecimentos:** Os ensaios experimentais foram realizados no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. A esta instituição agradecemos os meios colocados à disposição. Este trabalho recebeu ainda apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia – Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior através do Projeto PTDC/ECM/114492/2009.

Manifestamos igualmente reconhecimento à Concremat, S.A., pelo seu contributo à realização destes ensaios através da fabricação dos modelos ensaiados.