

RESISTÊNCIA AO PUNÇOAMENTO DE LAJES FUNGIFORMES PRÉ-ESFORÇADAS - MÉTODO ALTERNATIVO DE CÁLCULO -

ANTÓNIO PINHO RAMOS
Professor Auxiliar
DEC/FCT/UNL
Portugal

VALTER LÚCIO
Professor Associado
DEC/FCT/UNL
Portugal

SUMÁRIO

Neste trabalho é exposto o método proposto pelos autores para determinação do esforço resistente ao punçoamento em lajes fungiformes pré-esforçadas, sendo igualmente apresentadas algumas recomendações de projecto aplicáveis ao dimensionamento deste tipo de estruturas. O método proposto foi aplicado a modelos ensaiados experimentalmente por diversos autores, elaborados com a finalidade de estudar o fenómeno de resistência ao punçoamento de lajes fungiformes pré-esforçadas. Os valores resistentes previstos foram comparados com os valores obtidos experimentalmente, utilizando não só o método proposto, mas também o Eurocódigo 2 [1] (EC2) e o CEB-FIP Model Code de 1990 [2] (MC90), complementado pelas recomendações da FIP para o dimensionamento de lajes fungiformes pré-esforçadas [3].

1. INTRODUÇÃO

Num mercado cada vez mais concorrencial, o engenheiro defronta-se quotidianamente com novos desafios, tanto tecnológicos como técnicos. Imperativos de ordem estética e económica levam à concepção e cálculo de estruturas cada vez mais arrojadas.

A utilização de estruturas em laje fungiforme tornou-se corrente nos últimos anos. Este facto deve-se fundamentalmente à simplicidade, economia e rapidez de execução, assim como à flexibilidade de utilização dos espaços construídos.

A solução de lajes fungiformes com utilização de pré-esforço é menos frequente, mas permite alcançar uma série de vantagens em relação a soluções não pré-esforçadas. Relativamente a estas, torna possível vencer maiores vãos ou adoptar soluções mais esbeltas para vãos da mesma ordem de grandeza. Por outro lado, permite uma maior eficiência no controlo da deformação e da fendilhação para as condições de serviço. Ainda pelo facto de serem possíveis soluções mais esbeltas, necessariamente com menor peso, os efeitos das acções sísmicas são minorados, o que pode ser um factor importante em zonas de elevada sismicidade.

Apesar do seu aspecto simples, uma laje fungiforme tem um complexo sistema de comportamento resistente aos esforços de flexão e de corte, especialmente na zona de ligação laje-pilar. A resistência ao punçoamento é um factor importante no dimensionamento deste tipo de estruturas, sendo frequentemente o factor condicionante para a escolha da espessura da laje, ou pelo menos da espessura na zona do capitel, se for esta a solução adoptada.

O punçoamento é uma rotura que ocorre numa zona de descontinuidade (ligação laje-pilar), onde se verificam elevadas tensões originadas pelos esforços de flexão e de corte. Trata-se de uma das descontinuidades estáticas mais críticas em estruturas de betão armado, onde se desenvolve um estado tridimensional de tensões extraordinariamente complexo.

A rotura por punçoamento é pois um fenómeno complicado onde intervêm numerosos parâmetros, cuja consideração nos métodos de cálculo na sua globalidade não é facilmente exequível. Além disso, o punçoamento está associado a um modo de rotura frágil e sem possibilidade de redistribuição de esforços. A ocorrência de uma rotura local por punçoamento numa laje fungiforme, pode induzir novas roturas em pilares adjacentes, podendo conduzir ao colapso total dessa mesma laje, ou ainda, a um colapso progressivo de toda a estrutura. Assim sendo, para se assegurar simultaneamente segurança e economia, é necessário um método fiável e rigoroso para a quantificação da resistência ao punçoamento.

O problema do punçoamento tem sido tratado analiticamente por vários autores, usando os mais variados modelos de comportamento e critérios de rotura. No entanto, nenhum destes modelos analíticos propostos teve larga aceitação. A prova disto é que a grande maioria dos regulamentos, ou recomendações internacionais, utilizam expressões empíricas para cálculo da resistência ao punçoamento em lajes fungiformes, baseadas essencialmente em resultados de ensaios experimentais.

Neste trabalho é proposto um método alternativo para determinação do esforço resistente ao punçoamento. O método proposto tem a particularidade de separar o efeito da compressão no plano da laje, do efeito da componente vertical da força de desvio sobre o pilar, provocada pela mudança de direcção dos cabos de pré-esforço. Os valores resistentes previstos aplicando este método são comparados com os resultados de modelos experimentais executados por vários autores, de forma a avaliar o sua fiabilidade.

2. MÉTODO PROPOSTO PARA CÁLCULO DO VALOR MÉDIO DO ESFORÇO RESISTENTE AO PUNÇOAMENTO

Os autores propõem que o valor médio do esforço resistente ao punçoamento em lajes fungiformes pré-esforçadas (V_{Rm}) seja obtido através da Expressão (1), segundo a filosofia do CEB-FIP Model Code de 1990 [2]. Nesse documento o perímetro de referência (u) é definido por uma linha fechada envolvendo a área carregada, a uma distância desta de $2d$, e cujo perímetro é mínimo.

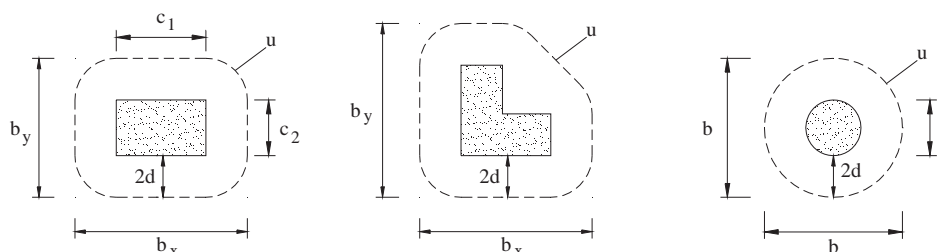


Figura 1 – Perímetro de referência considerado no método proposto

$$V_{Rm} = 0.18 \xi (100 \rho f_{cm})^{1/3} u d \quad (1)$$

Nesta expressão o valor da tensão média da rotura à compressão do betão em provetes cilíndricos (f_{cm}) deverá ser considerado em MPa, e:

$$\xi = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \quad (d \text{ em mm}) \quad (2)$$

A altura útil é determinada através da média das alturas úteis da armadura aderente nas duas direcções ortogonais:

$$d = \frac{d_x + d_y}{2} \quad (3)$$

Para pré-esforço não aderente, os autores propõem que a percentagem geométrica de armadura longitudinal (ρ) a utilizar na Expressão (1), seja obtida tendo em conta não só a armadura ordinária de flexão (ρ_s), mas também os efeitos da compressão provocada pelo pré-esforço (ρ_{comp}) e da excentricidade deste (ρ_{exc}), através da seguinte expressão, uma vez que, tal como a armadura ordinária, também os efeitos do pré-esforço contribuem para o controlo da resistência conferida pelos inertes na fenda de punçoamento e para a definição da posição da linha neutra, isto é, da quantidade de betão comprimido existente junto à face inferior da laje junto ao pilar:

$$\rho = \rho_s + \rho_{comp} + \rho_{exc} \quad (4)$$

A parcela da percentagem geométrica de armadura longitudinal relativa à armadura ordinária de flexão poderá ser calculada por:

$$\rho_s = \frac{A_s}{b d} \quad (5)$$

Em que, A_s é a área de armadura ordinária aderente, d a altura útil determinada através da Expressão (3) e b uma largura igual à dimensão do pilar ou área carregada adicionada de $2d$ para cada lado (ou da distância ao bordo da laje, se esta for inferior).

A contribuição da compressão no plano da laje originada pelo pré-esforço, na percentagem

geométrica de armadura longitudinal, poderá ser determinada através de:

$$\rho_{comp} = \frac{\sigma_{cp}}{\sigma_s} \frac{z - d + \frac{h}{2}}{z} \frac{h}{d} \quad (6)$$

Nesta expressão σ_{cp} é a tensão média de compressão no betão devida ao pré-esforço, σ_s a tensão de tracção nas armaduras longitudinais correspondente à carga de rotura ao punçoamento, h a altura da laje e z o braço do binário. Considerando agora, como simplificações, que σ_s é aproximadamente igual ao valor da tensão de cedência da armadura ordinária (f_{sy}) e que para uma laje fungiforme típica:

$$\frac{z - d + \frac{h}{2}}{z} \frac{h}{d} \approx \frac{1}{2} \quad (7)$$

vem que:

$$\rho_{comp} \approx \frac{1}{2} \frac{\sigma_{cp}}{f_{sy}} \quad (8)$$

A participação da excentricidade do pré-esforço no cálculo da percentagem geométrica de armadura longitudinal poderá ser tida em conta através da seguinte expressão:

$$\rho_{exc} = \frac{\sigma_p}{\sigma_s} \frac{A_{sp}}{b d} \frac{d_p - \frac{h}{2}}{z} \quad (9)$$

Em que, σ_p é a tensão de tracção na armadura de pré-esforço, A_{sp} a área de armadura de pré-esforço existente na largura b e d_p a altura útil da armadura de pré-esforço. Considerando que o braço do binário (z) em lajes fungiformes correntes é da ordem de grandeza de $3/4h$, vem que:

$$\rho_{exc} \approx \frac{\sigma_p}{f_{sy}} \frac{A_{sp}}{b d} \frac{2d_p - h}{1.5h} \quad (10)$$

Na hipótese da percentagem geométrica de armadura longitudinal ser diferente nas duas direcções ortogonais, a percentagem geométrica de armadura a utilizar na Expressão (1) pode ser calculada por:

$$\rho = \frac{\rho_x b_y + \rho_y b_x}{b_x + b_y} \quad (11)$$

Em que b_x e b_y são as dimensões do contorno de referência nas direcções x e y , respectivamente.

No caso do pré-esforço ser aderente, deverá ainda ser considerado no cálculo da percentagem geométrica de armadura longitudinal, a percentagem geométrica de armadura de pré-esforço (ρ_p):

$$\rho = \rho_s + \rho_{comp} + \rho_{exc} + \rho_p \quad (12)$$

em que:

$$\rho_p = \frac{A_{sp}}{b d} \quad (13)$$

Nesta situação, as alturas úteis em cada direcção ortogonal serão calculadas através expressão que se apresenta em seguida, sendo a altura útil resultante determinada através da utilização da Expressão (3).

$$d = \frac{A_s d_s + A_{sp} d_p}{A_s + A_{sp}} \quad (14)$$

A componente vertical da força de desvio do pré-esforço sobre o pilar deve ser descontada à força actuante de punçoamento. Propõe-se que para este efeito sejam considerados apenas os cabos que se encontrem a menos de $d_p/2$ da face do pilar ou área carregada, em que d_p é altura útil do respectivo cabo.

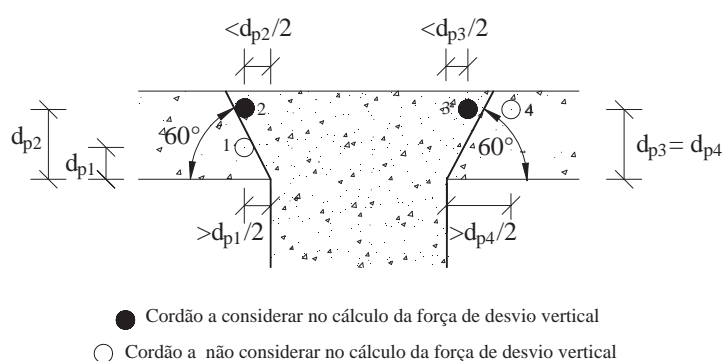


Figura 2 – Cone fictício para cálculo da força vertical de desvio devida à mudança de direcção dos cabos de pré-esforço

Deste modo, a força efectiva média de punçoamento ($V_{Sm,eff}$) poderá ser calculada através da seguinte expressão:

$$V_{Sm,eff} = V_{Sm} - V_{desvio} \quad (15)$$

Em que, V_{Sm} é a força actuante de punçoamento devido às cargas aplicadas (incluindo os efeitos hiperstáticos do pré-esforço) e V_{desvio} a componente vertical da força de desvio do pré-esforço sobre o pilar, originada pela mudança de direcção dos cordões de pré-esforço.

No cálculo da componente vertical da força de desvio sobre o pilar devida à mudança de direcção dos cabos de pré-esforço, poderá ser utilizado o desvio vertical final do pré-esforço, entrando em linha de conta com a deformação vertical induzida pelo carregamento. Numa laje fungiforme pré-esforçada esta deformação dará origem ainda a um incremento da tensão de tracção dos cabos de pré-esforço, que poderá igualmente ser considerado.

3. APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO A ENSAIOS EXPERIMENTAIS

O método descrito foi aplicado a alguns ensaios experimentais levados a cabo para estudo do fenómeno de resistência ao punçoamento de lajes fungiformes pré-esforçadas, nomeadamente os elaborados por Gerber e Burns [4], Nylander et al [5], Pralong et al [6], Regan [7,8,9], Shehata [10], Hassanzadeh [11] e Ramos [12]. Os resultados experimentais destes ensaios foram igualmente comparados com os valores dos esforços resistentes previstos usando o preconizado pelo Eurocódigo 2 [1] (EC2) e pelo CEB-FIP Model Code de 1990 [2] (MC90), complementado pelas recomendações da FIP para o dimensionamento de lajes fungiformes pré-esforçadas [3,13]. No Quadro 1 é apresentada uma síntese dos resultados alcançados.

Quadro 1(a) – Comparação entre a força efectiva de punçoamento e o valor médio do esforço resistente ao punçoamento

| Modelo | V _{exp} (kN) | EC2 | | | MC90/FIP | | | Método Proposto | | |
|--------------------|-----------------------|---------------------------|----------------------|-----------------------------------|---------------------------|----------------------|-----------------------------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| | | V _{eff} (1) (kN) | V _{Rm} (kN) | V _{eff} /V _{Rm} | V _{eff} (2) (kN) | V _{Rm} (kN) | V _{eff} /V _{Rm} | V _{eff} (1) (kN) | V _{Rm} (3) (kN) | V _{eff} /V _{Rm} |
| Gerber e Burns | | | | | | | | | | |
| C2 | 857 | 811 | 642 | 1.26 | 717 | 582 | 1.23 | 811 | 681 | 1.19 |
| C3 | 902 | 856 | 586 | 1.46 | 762 | 472 | 1.61 | 856 | 582 | 1.47 |
| Nylander et al (4) | | | | | | | | | | |
| 1 | 709 | 620 | 768 | 0.81 | 567 | 569 | 1.00 | 649 | 693 | 0.94 |
| 2 | 797 | 678 | 675 | 1.00 | 628 | 576 | 1.09 | 737 | 706 | 1.04 |
| 3 | 921 | 802 | 739 | 1.09 | 752 | 595 | 1.26 | 861 | 730 | 1.18 |
| 4 | 701 | 582 | 433 | 1.34 | 532 | 498 | 1.07 | 641 | 611 | 1.05 |
| 5 | 659 | 480 | 574 | 0.84 | 517 | 512 | 1.01 | 599 | 622 | 0.96 |
| Pralong et al | | | | | | | | | | |
| P7 | 767 | 700 | 570 | 1.23 | 648 | 561 | 1.16 | 726 | 625 | 1.16 |
| P8 | 687 | 601 | 460 | 1.31 | 554 | 358 | 1.55 | 635 | 497 | 1.28 |
| P9 | 813 | 735 | 507 | 1.45 | 682 | 427 | 1.60 | 764 | 515 | 1.48 |
| Regan (4) | | | | | | | | | | |
| DT1 | 780 | 780 | 904 | 0.86 | 780 | 828 | 0.94 | 780 | 828 | 0.94 |
| DT2 | 832 | 798 | 833 | 0.96 | 692 | 662 | 1.05 | 815 | 811 | 1.01 |
| DT4 | 715 | 704 | 885 | 0.80 | 671 | 699 | 0.96 | 710 | 751 | 0.95 |
| DT5 | 910 | 876 | 942 | 0.93 | 770 | 686 | 1.12 | 893 | 846 | 1.06 |
| DT6 | 832 | 799 | 875 | 0.91 | 693 | 643 | 1.08 | 778 | 816 | 0.95 |
| DT8 | 676 | 670 | 821 | 0.82 | 643 | 685 | 0.94 | 673 | 720 | 0.93 |
| DT9 | 806 | 772 | 1004 | 0.77 | 666 | 620 | 1.07 | 789 | 866 | 0.91 |
| DT10 | 832 | 799 | 896 | 0.89 | 632 | 728 | 0.87 | 795 | 867 | 0.92 |
| EL2 | 608 | 578 | 521 | 1.11 | 519 | 428 | 1.21 | 593 | 512 | 1.16 |
| EL3 | 645 | 585 | 518 | 1.13 | 510 | 474 | 1.08 | 615 | 545 | 1.13 |
| EL5 | 510 | 480 | 430 | 1.12 | 421 | 397 | 1.06 | 495 | 476 | 1.04 |

Quadro 1(b) – Comparação entre a força efectiva de punçoamento e o valor médio do esforço resistente ao punçoamento

| Modelo | V _{exp} (kN) | EC2 | | | MC90/FIP | | | Método Proposto | | |
|-------------|-----------------------|---------------------------|----------------------|-----------------------------------|---------------------------|----------------------|-----------------------------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| | | V _{eff} (1) (kN) | V _{Rm} (kN) | V _{eff} /V _{Rm} | V _{eff} (2) (kN) | V _{Rm} (kN) | V _{eff} /V _{Rm} | V _{eff} (1) (kN) | V _{Rm} (3) (kN) | V _{eff} /V _{Rm} |
| Shehata | | | | | | | | | | |
| SP1 | 988 | 878 | 569 | 1.54 | 751 | 337 | 2.22 | 844 | 600 | 1.41 |
| SP2 | 624 | 581 | 586 | 0.99 | 519 | 422 | 1.23 | 565 | 549 | 1.03 |
| SP4 | 884 | 700 | 668 | 1.05 | 619 | 353 | 1.75 | 744 | 674 | 1.10 |
| SP5 | 780 | 688 | 582 | 1.18 | 619 | 351 | 1.76 | 710 | 580 | 1.22 |
| SP6 | 728 | 654 | 615 | 1.06 | 541 | 355 | 1.52 | 638 | 594 | 1.07 |
| Hassanzadeh | | | | | | | | | | |
| A1 | 668 | 536 | 425 | 1.26 | 509 | 276 | 1.85 | 602 | 515 | 1.17 |
| A2 | 564 | 564 | 395 | 1.43 | 461 | 269 | 1.71 | 564 | 401 | 1.41 |
| B1 | 439 | 439 | 703 | 0.62 | 439 | 499 | 0.88 | 439 | 499 | 0.88 |
| B2 | 827 | 827 | 750 | 1.10 | 708 | 491 | 1.44 | 816 | 620 | 1.32 |
| B3 | 1113 | 914 | 747 | 1.22 | 913 | 490 | 1.87 | 1027 | 751 | 1.37 |
| B4 | 952 | 952 | 769 | 1.24 | 834 | 497 | 1.68 | 952 | 640 | 1.49 |
| Ramos | | | | | | | | | | |
| AR2 | 258 | 258 | 254 | 1.02 | 258 | 270 | 0.96 | 258 | 270 | 0.96 |
| AR3 | 270 | 270 | 245 | 1.10 | 265 | 266 | 1.00 | 270 | 271 | 1.00 |
| AR4 | 252 | 252 | 275 | 0.92 | 244 | 279 | 0.88 | 252 | 287 | 0.88 |
| AR5 | 251 | 251 | 235 | 1.07 | 241 | 261 | 0.92 | 251 | 271 | 0.92 |
| AR6 | 250 | 250 | 242 | 1.03 | 240 | 265 | 0.91 | 250 | 274 | 0.91 |
| AR7 | 288 | 288 | 279 | 1.03 | 274 | 280 | 0.98 | 288 | 294 | 0.98 |
| AR8 | 380 | 308 | 280 | 1.10 | 308 | 278 | 1.11 | 266 | 287 | 0.93 |
| AR9 | 251 | 251 | 260 | 0.97 | 251 | 273 | 0.92 | 251 | 273 | 0.92 |
| AR10 | 371 | 315 | 280 | 1.13 | 315 | 278 | 1.13 | 276 | 286 | 0.97 |
| AR11 | 342 | 302 | 259 | 1.17 | 302 | 269 | 1.12 | 278 | 273 | 1.02 |
| AR12 | 280 | 186 | 205 | 1.04 | 186 | 239 | 0.90 | 233 | 243 | 0.96 |
| AR13 | 261 | 169 | 223 | 0.87 | 215 | 253 | 0.90 | 261 | 259 | 1.01 |
| AR14 | 208 | 169 | 195 | 0.90 | 208 | 240 | 0.87 | 208 | 241 | 0.86 |
| AR15 | 262 | 262 | 218 | 1.20 | 262 | 250 | 1.05 | 262 | 250 | 1.05 |
| AR16 | 351 | 278 | 213 | 1.30 | 278 | 249 | 1.11 | 244 | 254 | 0.96 |

(1) força efectiva de punçoamento: $V_{eff} = V_{exp} - V_{desvio}$ (Nesta expressão V_{exp} é valor experimental da carga de rotura e V_{desvio} a componente vertical da força de desvio do pré-esforço sobre o pilar)

(2) força efectiva de punçoamento: $V_{eff} = V_{exp} - V_0 - V_{desvio}$ (Nesta expressão V_{exp} é valor experimental da carga de rotura, V_0 é o valor da força de descompressão e V_{desvio} a componente vertical da força de desvio do pré-esforço sobre o pilar)

(3) calculado utilizando a Expressão 1 com ρ calculado através das Expressões 4 ou 12

(4) modelos de lajes rectangulares com pré-esforço apenas na direcção longitudinal

Optou-se pela inclusão do EC2 nesta comparação, porque a nível europeu este regulamento visa substituir os respectivos regulamentos nacionais. Convém referir, no entanto, que o EC2 se encontra actualmente em revisão, aproximando-se a formulação do problema do punçoamento a uma filosofia próxima da do MC90.

Foi feita uma análise estatística dos resultados obtidos tendo sido determinado o valor médio da razão V_{eff}/V_{Rm} , o seu desvio padrão e o coeficiente de variação (Quadro 2). Foram também elaborados gráficos (Figura 3) em que se analisa a influência da tensão média de rotura à compressão do betão em provetes cilíndricos (f_{cm}), da tensão média de compressão no betão devida ao pré-esforço ($\sigma_{cp,médio}$) e da altura útil da laje (d) no valor de V_{eff}/V_{Rm} . Nestes gráficos representa-se a traço interrompido o valor médio obtido neste universo de resultados experimentais e a traço cheio a recta de tendência (regressão linear).

Quadro 2– Valor médio, desvio padrão e coeficiente de variação da razão V_{eff}/V_{Rm}

| Código | n (1) | \bar{X}_m (2) | σ_{n-1} (3) | v (4) |
|-----------------|-------|-----------------|--------------------|-------|
| EC2 | | 1.077 | 0.200 | 0.186 |
| MC90 | 47 | 1.180 | 0.300 | 0.254 |
| Método Proposto | | 1.075 | 0.176 | 0.164 |

(1) número de ensaios considerados (2) valor médio (3) desvio padrão (4) coeficiente de variação

Dos três métodos apresentados o MC90/FIP é o que apresenta piores resultados, tanto em termos de valor médio como em termos de desvio padrão. A aplicação deste regulamento conduziu a valores algo conservadores para a razão V_{eff}/V_{Rm} . Tal facto deve-se, muito provavelmente, a que nas recomendações da FIP [3,13] que estendem a aplicabilidade do MC90 a lajes fungiformes pré-esforçadas, o cálculo da força de descompressão (V_0) é feito tendo somente em conta a tensão média de compressão no betão devida ao pré-esforço. O efeito da excentricidade dos cabos de pré-esforço não é considerado.

O método proposto neste trabalho obteve um valor médio para a razão V_{eff}/V_{Rm} idêntico ao obtido utilizando o EC2, mas com uma menor dispersão dos resultados (menor desvio padrão). Além disso, se se proceder a uma análise em separado dos ensaios de Nylander et al [5] e Regan [7,8,9] (modelos de lajes rectangulares pré-esforçadas apenas na direcção longitudinal), obtém-se uma média para a razão V_{eff}/V_{Rm} de 1.01 usando o método proposto, e de 0.96 com o EC2. Este último valor é ligeiramente contra a segurança. Nos restantes modelos a média da referida grandeza é de 1.11 e de 1.14, respectivamente segundo o método proposto e o EC2. O método proposto conduz a resultados ligeiramente melhores, em ambas as situações.

De referir, no entanto, que os bons resultados apresentados pelo EC2 devem-se com grande probabilidade à gama de resistências à compressão dos betões utilizados. De facto, num documento recente da Fib [14], no qual se comparam as cargas de rotura experimentais com os valores do esforço médio resistente previsto pelo EC2, de 112 modelos de laje fungiforme não pré-esforçadas submetidas a ensaios de punçoamento centrado, conduzem a valores de V_{eff}/V_{Rm} próximos da unidade para resistências médias à compressão em provetes cilíndricos de cerca de 40 MPa. Para betões com mais alta resistência o EC2 sobrestima o valor médio da resistência ao punçoamento, enquanto que para betões de menores resistências este valor é subestimado. Como informação adicional o valor médio de V_{eff}/V_{Rm} obtido para os 112 modelos considerados é de 1.28.

O EC2 apresenta ainda uma marcada tendência de sobrestimar a resistência ao punçoamento à medida que a resistência do betão aumenta (ver Figura 3) chegando mesmo à situação em que a recta de tendência está abaixo do valor unitário, e portanto contra a segurança.

Nos restantes métodos analisados nota-se de igual forma uma tendência de sobrestimar a resistência ao punçoamento com o aumento da resistência do betão, mas menos pronunciada do que a revelada pelo EC2.

Os três métodos de cálculo analisados revelam uma tendência de subestimar a resistência ao punçamento com o aumento da tensão média de compressão no betão devida ao pré-esforço, tornando-se mais conservadores.

O MC90/FIP e o método proposto denotam uma tendência de aumento do conservadorismo com o aumento da altura útil da laje. Pelo contrário, o EC2 revela uma ligeira tendência para a redução da segurança com o incremento desta grandeza.

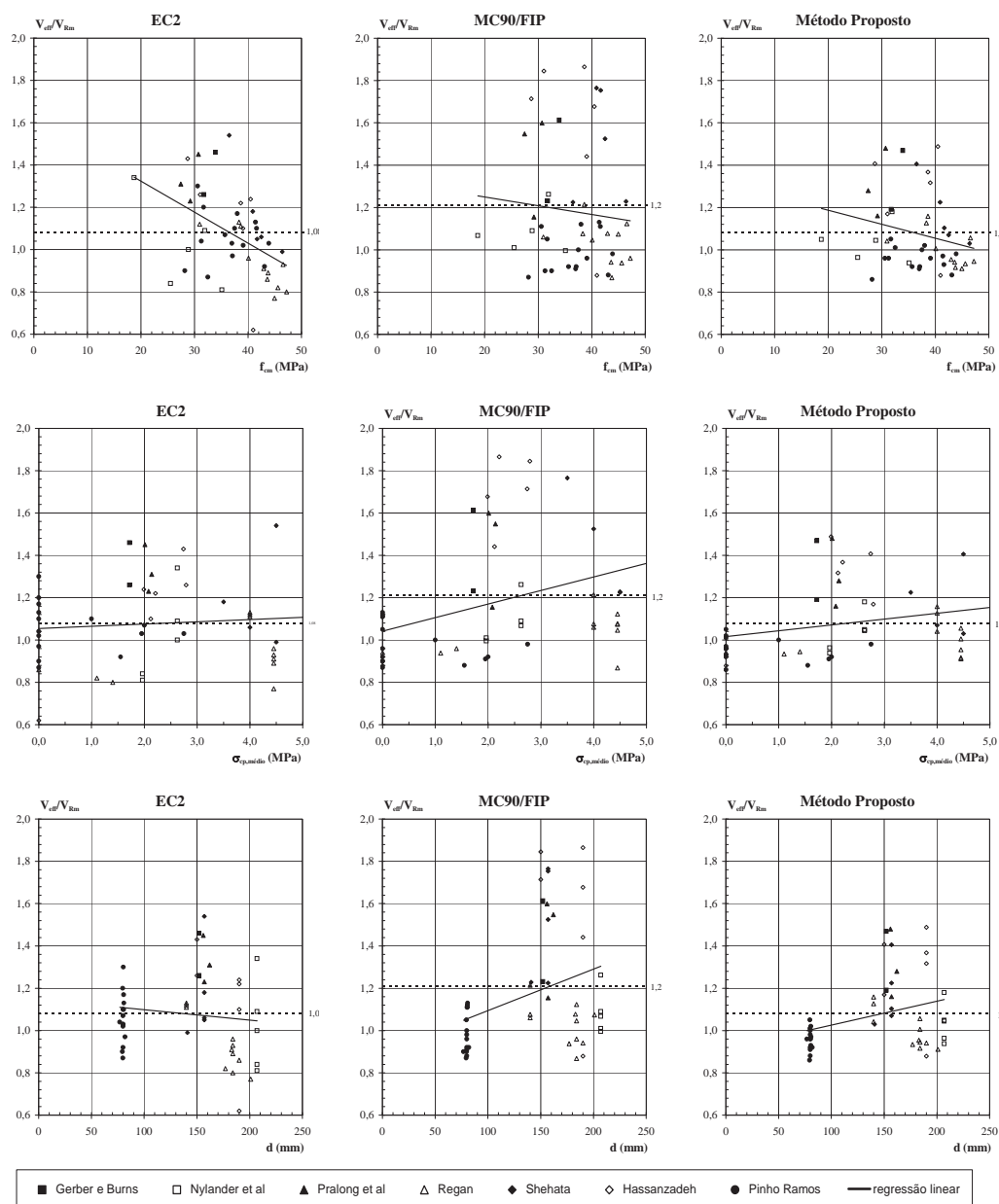


Figura 3 – Evolução de V_{eff}/V_{Rm} em função da tensão média de rotura do betão, da tensão média de compressão do betão devida ao pré-esforço e da altura útil da laje

4. RECOMENDAÇÕES DE PROJECTO

Na verificação do estado limite último de punçamento de uma laje fungiforme, e na situação de não se utilizar armadura específica, o valor de cálculo do esforço resistente ao punçamento pode ser obtido pela expressão recomendada pelo MC90 para lajes fungiformes não pré-esforçadas:

$$V_{Rd} = 0.12 \xi (100 \rho f_{ck})^{1/3} u d \quad (17)$$

O valor do coeficiente ξ é determinado aplicando a Expressão (2), a tensão característica de rotura à compressão do betão em provetes cilíndricos (f_{ck}) deverá ser considerada em MPa, o perímetro de referência (u) calculado como se esquematiza na Figura 1 e a altura útil calculada através da Expressão (3). A percentagem geométrica de armadura longitudinal (ρ) a utilizar na Expressão (17) é calculada através da Expressão (4), na hipótese de pré-esforço não aderente, ou através da Expressão (12), na situação em que este é aderente. A percentagem geométrica de armadura ordinária (ρ_s) é determinada com recurso à Expressão (5), enquanto que a percentagem geométrica de armadura de pré-esforço (ρ_p) é calculada através da Expressão (13). As componentes relativas à compressão provocada pelo pré-esforço (ρ_{comp}) e à excentricidade deste (ρ_{exc}) serão calculadas de forma aproximada pelas seguintes expressões, em que f_{syk} é a tensão característica de cedência do aço:

$$\rho_{comp} = \frac{1}{2} \frac{\sigma_{cp}}{f_{syk}} \quad (18)$$

$$\rho_{exc} = \frac{\sigma_p}{f_{syk}} \frac{A_{sp}}{b d} \frac{2d_p - h}{1.5h} \quad (19)$$

Para efeitos de quantificação de ρ_{comp} - Expressão (18) -, é necessário determinar com rigor qual o valor da tensão de compressão no betão, introduzida pelo pré-esforço na secção da laje em consideração. A difusão das forças de pré-esforço desde as ancoragens, e a existência de elementos verticais passíveis de absorver por corte parte da força de compressão, leva a dificuldades acrescidas na determinação rigorosa deste valor. Será sempre conservador não considerar o efeito da compressão provocada pelo pré-esforço, nos cálculos de verificação de segurança ao punçoamento de uma laje fungiforme.

O valor de cálculo da força efectiva de punçoamento é determinado, subtraindo ao valor de cálculo do esforço de punçoamento actuante (V_{Sd}), a componente vertical da força de desvio (V_{desvio}) originada pela mudança de direcção dos cordões de pré-esforço. No cálculo desta última grandeza só deverão ser considerados os cordões que se encontrem a menos de $d_p/2$ da face do pilar ou área carregada, sendo d_p a sua altura útil respectiva.

$$V_{Sd,eff} = V_{Sd} - V_{desvio} \quad (20)$$

Mais uma vez, não é fácil ao engenheiro projectista na fase de dimensionamento duma laje fungiforme, determinar duma forma rigorosa a deformação vertical que antecede a rotura ao punçoamento. Atendendo a que será sempre conservador não considerar esta deformação no cálculo da componente vertical da força de desvio, é recomendável que este efeito seja desprezado no dimensionamento, funcionando como segurança adicional. A mesma recomendação é válida igualmente para o incremento de força nos cordões de pré-esforço, originado pelo alongamento destes devido à deformação da laje.

Para um melhor comportamento pós-rotura ao punçoamento deste tipo de estruturas, é recomendável a colocação dos cabos de pré-esforço a passar dentro da armadura longitudinal dos pilares. Na hipótese de utilização de pré-esforço não aderente, deverá prever-se a existência de ancoragens intermédias, em média em cada dois vãos. Se necessário, e ainda para este efeito, poderá recorrer-se à colocação de armadura adicional junto à face inferior da laje, a passar de igual modo dentro da armadura longitudinal do pilar, e convenientemente amarrada na laje ou no interior do pilar.

5. AGRADECIMENTOS

Os ensaios experimentais realizados por Ramos [12], foram elaborados no Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura do Instituto Superior Técnico, tendo contado com o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia. A estas instituições agradecemos os meios colocados à disposição.

Manifestamos igualmente reconhecimento às Empresas que deram o seu contributo à realização destes ensaios, nomeadamente: à Concremat, S.A. pela fabricação de alguns dos modelos e à VSL, S.A. pelo fornecimento dos monocórdões de pré-esforço e respectivos sistemas de ancoragem.

6 REFERÊNCIAS

- [1] Norma Portuguesa NP ENV 1992-1-1: *Eurocódigo 2: Projecto de Estruturas de Betão – Parte 1.1: Regras Gerais e Regras para Edifícios*, Abril, 1998.
- [2] Comité Euro-International du Béton: *CEB-FIP Model Code 1990*, Bulletin d'information n° 213-214, Maio, 1993.
- [3] Fédération Internationale de la Précontrainte: *Recommendations for the Design of Post-Tensioned Slabs and Foundation Rafts*, Maio, 1998.
- [4] Gerber, L. L.; Burns, N. H.: *Ultimate Strength Tests of Post-Tensioned Flat Plates*, PCI Journal, Vol. 16, n° 6, Nov/Dez de 1971, p. 40-58.
- [5] Nylander, H.; Kinnunen, S.; Ingvarsson, H.: *Genomsstansning av Pelarunderstödda Plattbro av Betong med Spänd och Ospänd Armering*, Meddelande n° 123, Institutionen för Byggnadsstatik, Kungl Tekniska Högskolan (KTH), Estocolmo, 1977.
- [6] Pralong, J.; Brändli, W.; Thürlimann, B.: *Durchstanzversuche an Stahlbeton und Spannbetonplatten*, Bericht nr. 7305-3, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zurich, Dezembro, 1979.
- [7] Regan, P. E.: *The Punching Resistance of Prestressed Concrete Slab Bridges*, Report to the Department of Transport, Engineering Structures Research Group, Polytechnic of Central London, Londres, Abril, 1981.
- [8] Regan, P.E.; Chattopadhyay, B.: *Shear Tests of Prestressed Bridge Slabs Supported by Interior Columns*, Report to the Department of Transport, Engineering Structures Research Group, Polytechnic of Central London, Londres, Julho, 1982.
- [9] Regan, P. E.: *Punching Shear in Prestressed Concrete Slab Bridges*, Report to the Department of Transport, Engineering Structures Research Group, Polytechnic of Central London, Londres, Janeiro, 1983.
- [10] Shehata, I. A.: *Punching of Prestressed and Non-Prestressed Reinforced Concrete Flat Slabs*, M.Phil. Thesis, Polytechnic of Central London, Londres, 1982.
- [11] Hassanzadeh, G.: *Betongplattor på Pelare Dimensioneringsmetoder för Plattor med icke Vidhäftande Spännarmering*, Bulletin 43, Institutionen för Byggkonstruktion, Kungl Tekniska Högskolan (KTH), Estocolmo, 1998.
- [12] Ramos, A. M. P.: *Punçamento em Lajes Fungiformes Pré-Esforçadas*, Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2003.
- [13] Lúcio, V. J. G.; Appleton, J. A. S.; Almeida, J. F.: *The U.L.S. of Punching in the New FIP Recommendations for the Design of Post-Tensioned Slabs and Foundation Rafts*, Structural Concrete - FIP, n° 3, 2000.
- [14] Fédération Internationale du Béton: *Punching of Structural Concrete Slabs*, Bulletin 2, Technical Report prepared by the CEB/FIB Task Group – Utilisation of Concrete in Design, Lausanne, Abril, 2001.



ANTÓNIO PINHO RAMOS
Professor Auxiliar
Departamento de Engenharia Civil
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade Nova de Lisboa
Monte de Caparica
Lisboa



VALTER LÚCIO
Professor Associado
Departamento de Engenharia Civil
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade Nova de Lisboa
Monte de Caparica
Lisboa
FEUP