

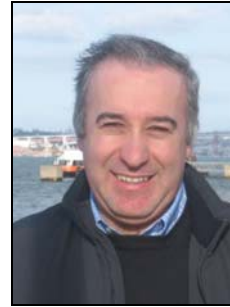
LIGAÇÃO PILAR – FUNDAÇÃO COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR, EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS



ROMEU REGUENGO
Eng. Civil
CONCREMAT S.A.
Palmela/Portugal



VÁLTER LÚCIO
Prof. Associado
Univ. Nova de Lisboa
Caparica/Portugal



CARLOS CHASTRE
Prof. Auxiliar
Univ. Nova de Lisboa
Caparica/Portugal

SUMÁRIO

A ligação pilar-fundação tem um papel fundamental no comportamento das estruturas pré-fabricadas, em particular, na presença de acções horizontais, como a acção dos sismos e do vento, que introduzem esforços elevados na base dos pilares. Um dos sistemas de ligação pilar-fundação usados em estruturas pré-fabricadas consiste em deixar na extremidade inferior dos pilares armaduras salientes que são introduzidas em negativos executados nas fundações. Estes negativos são posteriormente injectados com grout para garantir a ligação. No presente trabalho foram estudadas diferentes soluções de negativos para ligação das armaduras do pilar à fundação, tendo sido realizados ensaios monotónicos para analisar o seu comportamento. Nesta comunicação apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos da análise experimental efectuada.

Palavras-chave: Pré-Fabricação, Ligação, Pilar-Fundação, Selagem, Grout.

1. INTRODUÇÃO

As ligações pilar-fundação mais correntes são dos tipos indicados na figura 1. O primeiro e segundo exemplos ((a) e (b)) correspondem a pilares encastrados numa cavidade executada na fundação (sapata ou maciço de encabeçamento de estacas), com posterior betonagem do espaço livre entre a superfície interior da cavidade e as faces laterais do pilar. No terceiro e quarto casos, (c) e (d), existem armaduras salientes do pilar ou da fundação, respectivamente, que são introduzidas em aberturas e posteriormente seladas por injeção de uma argamassa,

comummente designada por “grout”. O quinto e último tipo indicado corresponde a uma ligação semelhante às ligações utilizadas em estruturas metálicas, constituída por ferrolhos salientes da fundação que são aparafusados a uma chapa a qual vem soldada às armaduras na base do pilar. Para o dimensionamento da fundação em si podem ser consultados trabalhos de Silva [1] e Lúcio e Silva [2].

O dimensionamento das armaduras seladas com grout é similar ao dimensionamento de ligações betonadas in situ, contudo, é necessário rigor no modo de executar esta ligação para ela seja eficiente. Tendo em conta que uma ligação com varões selados com grout é pouco deformável, o seu dimensionamento depende, essencialmente, da resistência aos estados limites últimos [3].

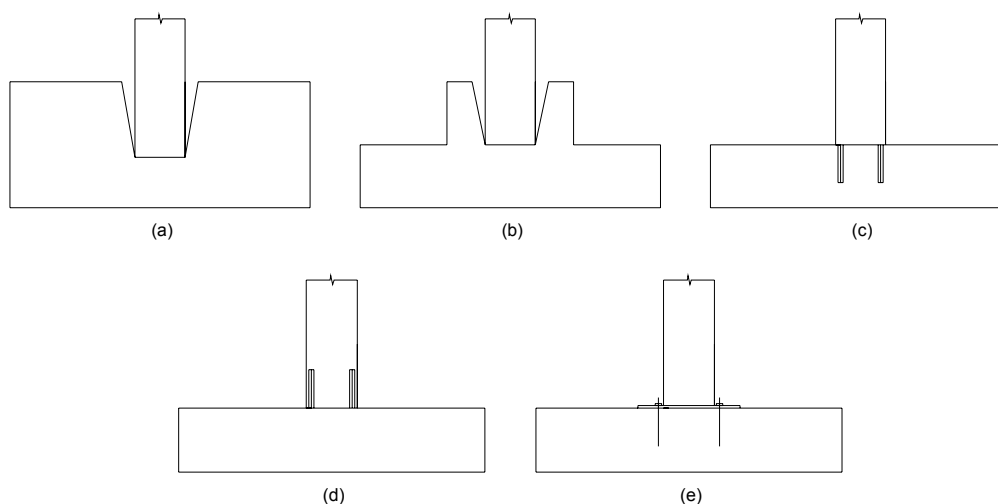


Figura 1: Ligações pilar-fundação mais correntes [2].

O presente trabalho tem como objectivo o estudo da ligação pilar fundação com armaduras salientes no pilar seladas com *grout* na fundação, como indicado na figura 1 (c). Os negativos existentes nas fundações podem ser realizados por meio de bainhas metálicas, previamente betonados no maciço de fundação, ou consistirem em furos realizados após a betonagem da fundação por carotagem.

Foram estudados os seguintes tipos de negativos:

- bainhas em tubo de aço de 52 mm de diâmetro com 20 cm de comprimento de embebiamento na fundação (L20);
- idem, cintadas através de uma armadura helicoidal de diâmetro 6 mm espaçada de 4 cm (LC20);
- bainhas de pré-esforço de 52 mm de diâmetro com 10, 15, 20 e 25 cm de comprimento de embebiamento (P10, P15, P20 e P25);

- bainhas de pré-esforço de 52 mm de diâmetro com 20 cm de comprimento de embeimento e cintadas através de uma armadura helicoidal de diâmetro 6 mm espaçada de 4 cm (PC20);
- furo realizado com carotadeira com 52 cm de diâmetro e 20 cm de profundidade (CM20).

Para referência, foi ensaiada uma ancoragem constituída por um varão embebido 20 cm no betão aquando da betonagem dos maciços. No estudo foram usados varões de 20 mm de diâmetro em aço A500NR.

2. DIMENSIONAMENTO DA LIGAÇÃO

A quantificação da resistência da ancoragem dos varões na ligação pilar-fundação pode ser efectuada através dos modelos de cálculo da resistência da ancoragem de varões, ou ferrolhos, pós-instalados no betão e selados com grout. Neste âmbito são conhecidos diversos trabalhos de Eligehausen [4, 5], de Miltenberger [6] e Khunz et all [7] (este último com selagem com resinas), entre outros.

Tipicamente a rotura da ligação executada através de um varão embebido num negativo deixado no betão e selado com grout, pode acontecer pelas seguintes razões (Figura 2):

1. cedência do aço do varão ----- $F_{Rd,1} = A_s f_{yd}$ (1)
2. rotura da ligação entre o aço e o grout ----- $F_{Rd,2} = \pi \phi h_{ef} f_{bd,grout}$ (2)
3. rotura da ligação entre o aço e o betão ----- $F_{Rd,3} = \pi d h_{ef} f_{bd}$ (3)
4. rotura com forma cónica pelo betão ----- $F_{Rd,4} = 12.5 (f_{cd})^{0.5} (h_{ef})^{1.5}$ (4)

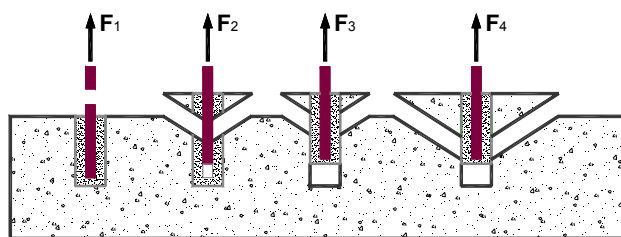


Figura 2: Modos de rotura da ligação executada com varão embebido num negativo selado com grout [6].

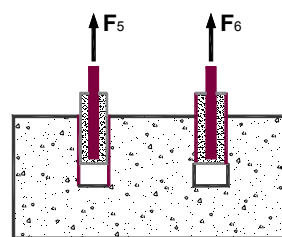


Figura 3: Modos de rotura com bainha metálica.

As expressões (1) a (5) quantificam o valor de cálculo da resistência à tracção da ligação (F_{Rd}), e nelas A_s é a área da secção transversal do varão e ϕ o seu diâmetro, f_{yd} corresponde ao valor de cálculo da tensão de cedência do aço do varão, h_{ef} é o comprimento de embeimento do varão e d é o diâmetro interior do negativo, $f_{bd,grout}$ e f_{bd} representam o valor de cálculo da resistência por aderência do grout e do betão, respectivamente, e f_{cd} o valor de cálculo da resistência à compressão do betão.

No caso de ligações em que é usada uma bainha para realizar o negativo onde vai ser embebido o varão, e por analogia com os modelos de rotura anteriores, para além do modo de rotura 1, 3 e 4 (ver Figura 2), é ainda possível obter os modos de rotura representados na Figura 3:

$$5. \text{ rotura da ligação entre a bainha e o grout } \text{-----} \quad F_{Rd,2} = \pi d_{int} h_{ef} f_{bd,grout} \quad (5)$$

$$6. \text{ rotura da ligação entre a bainha e o betão } \text{-----} \quad F_{Rd,2} = \pi d_{ext} h_{ef} f_{bd} \quad (6)$$

onde d_{int} e d_{ext} representam, respectivamente, os diâmetros interior e exterior da bainha.

A expressão (4) é válida apenas nos casos em que $h_{ef} < 280\text{mm}$. Para $280\text{mm} \leq h_{ef} \leq 635\text{mm}$ deve ser usada a expressão (7).

$$F_{Rd,4} = 4.75 (f_{cd})^{0.5} (h_{ef})^{1.67} \quad (7)$$

Nas expressões (4) e (7) h_{ef} e f_{cd} têm unidades de mm e N/mm^2 . As expressões recomendadas para o modo de rotura 4 referem-se a uma ligação isolada no interior de um maciço de betão com espessura considerável. Nos casos de agrupamento de ligações ou de ligações próximas dos limites do maciço de fundação, deverão ser considerados coeficientes redutores da força resistente. Estes coeficientes estão disponíveis na literatura e não são relevantes para o presente estudo. Os valores obtidos com as expressões (1) a (7) deverão ser reduzidos a metade [5, 6] nas situações em que o betão se encontra fendilhado, e não se aplicam no caso de acções cíclicas [4].

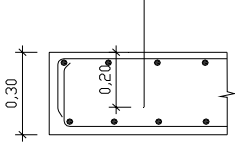
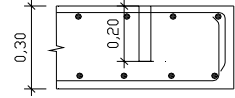
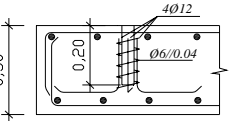
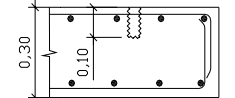
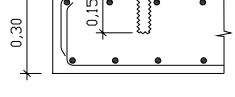
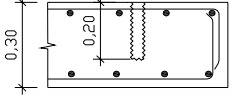
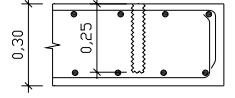
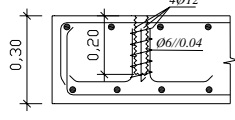
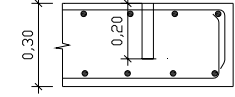
2. MODELOS DE ENSAIO

Foram executados quatro maciços de betão, com $2.00 \times 1.20 \times 0.30\text{m}$ e armados nas duas faces com uma malha quadrada de varões nervurados de 10 mm de diâmetro espaçados de 15 cm. Os modelos foram agrupados em séries de três ensaios para cada tipo de ligação.

No Quadro 1 apresentam-se a geometria, as dimensões e a designação atribuída às séries de modelos ensaiados. A primeira letra da designação atribuída refere-se a bainha de pré-esforço (P), bainha em tubo de aço (L), furo de carotadeira (C) ou a varão simplesmente embebido (V). A letra C refere-se à existência de cintagem da bainha através de uma armadura helicoidal de diâmetro 6 mm espaçada de 4 cm. Os números que se a seguem indicam o comprimento de embebimento em centímetros.

O primeiro maciço de betão continha as ligações P20 (Figura 4.a) e PC20 (Figura 4.b.), num total de seis negativos. O segundo maciço de betão continha outros dois tipos de ligações: L20 (Figura 4.c) e LC20 (Figura 4.d), também com um total de seis negativos. O terceiro maciço de betão tinha embebidos três varões de aço de 20 mm de diâmetro com um comprimento de embebimento de 20 cm, designados por V20 (Figura 4.e), e três ligações do tipo P10 (Figura 4.f). O quarto maciço de betão continha dois tipos de ligações P15 (Figura 4.g) e P25 (Figura 4.h), num total de seis negativos.

Quadro 1: Designação dos modelos de ligação

Designação	Tipo de Ligação	Diâmetro (mm)	Comprimento de Embebimento (cm)
V20		20	20
L20		52	20
LC20		52	20
P10		52	10
P15		52	15
P20		52	20
P25		52	25
PC20		52	20
CM20		52	20

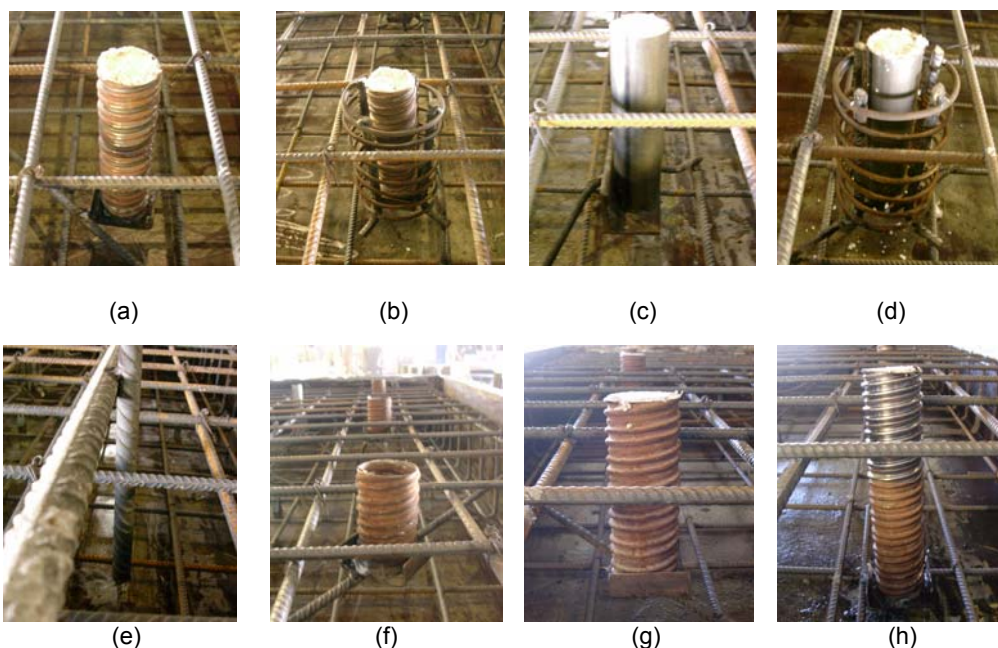
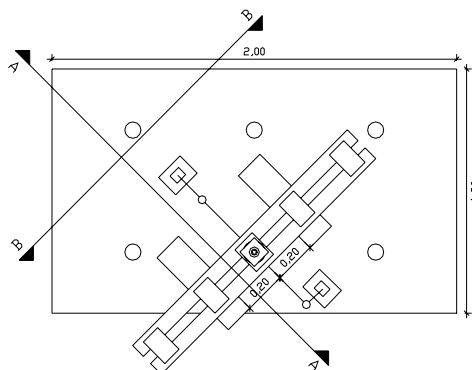


Figura 4: Ligações ensaiadas.

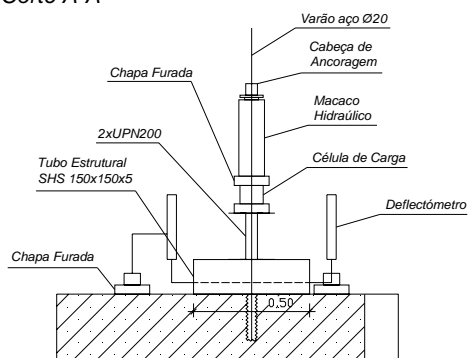
Os negativos realizados por carotagem, com coroa de 52 mm de diâmetro, foram efectuados na parte inversa de um maciço de betão já ensaiado, escolhendo zonas não fendilhadas. Os furos foram realizados entre os varões da armadura, tendo estes sido localizados com o "FerroScan" da HILT. Após a cura do betão, procedeu-se à instalação dos varões e respectiva selagem com grout.

3. SISTEMA DE ENSAIO E INSTRUMENTAÇÃO

Os ensaios dos modelos foram realizados no laboratório de estruturas do Departamento Engenharia Civil da Universidade Nova de Lisboa. O sistema de ensaio de arrancamento dos varões de aço era constituído por uma estrutura metálica de reacção formada por dois perfis de secção quadrada e uma viga composta por dois perfis UNP. Sobre esta estrutura assentava um cilindro hidráulico Enerpac RRH 307, accionado pela bomba hidráulica Enerpac GPEW2020, e uma célula de carga TML-TCLP-20KN. O sistema de transmissão da força de ao varão é conseguido com uma cabeça de ancoragem de pré-tensão e respectivas cunhas. A instrumentação utilizada incluía também um transdutor de deslocamentos CDP100. O sistema de ensaio utilizado encontra-se ilustrado nas Figura 5.



Corte A-A



Corte B-B

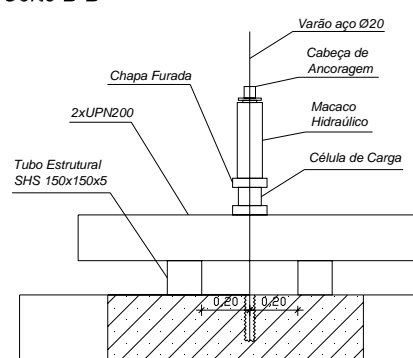


Figura 5: Sistema de ensaio

4. MATERIAIS

A betonagem dos quatro blocos de betão foi realizada na Secil – Prebetão. Por cada betonagem foram recolhidos seis provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. A caracterização mecânica do betão foi efectuada através de ensaios de compressão realizados à data de ensaio das ligações em estudo. No quadro 2 apresentam-se os resultados médios da resistência à compressão (f_{cm}) e os valores médios da resistência à tracção, determinados de segundo a EN1992.1.1 [8].

Os varões de aço de $\varnothing 20$ utilizados são da classe A500NR, tendo ensaiados provetes representativos. O aço apresenta uma tensão de cedência média de 543,8 MPa, que equivale à força de cedência de 170,83 KN.

Relativamente ao grout utilizado, prepararam-se, na altura da selagem da ligação, 3 provetes com $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ para determinar a resistência à tracção por flexão deste material. Os ensaios foram realizados à data dos ensaios da ligação. No Quadro 3 apresentam-se os valores obtidos para a força de rotura (F), a tensão de rotura à tracção por flexão ($f_{ct,fl}$), bem

como os correspondentes valores médios e o valor da resistência à tracção simples (f_{ctm}), determinado de acordo com [8].

Quadro 2: Caracterização dos betões.

Tipo de Ligação	Idade (dias)	f_{cm} (MPa)	f_{ctm} (MPa)
P20 e PC20	32	34,9	2.7
L20 e LC20	37	26,2	2.1
V20 3 P10	45	33,0	2.6
P15 e P25	31	31,8	2.5
CM	240	34,0	2.6

Quadro 3: Valores dos ensaios de tracção por flexão dos provetes de grout.

Provete	F (N)	F_m (N)	$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{ctm,fl}$ (MPa)	f_{ctm} (MPa)
G1	3045		8,56		
G2	3269	3082	9,19	8,9	5.7
G3	2932		8,25		

5. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Dado o comportamento não linear das ligações estudadas optou-se por determinar um Modelo Elasto-plástico Equivalente, calculado de acordo com as expressões de (8) a (17), o qual permite comparar entre si o desempenho das diversas ligações ensaiadas. Para a definição deste Modelo Elasto-plástico Equivalente considerou-se que a energia de deformação do modelo era idêntica à energia dispendida até à rotura pela ligação ensaiada. Começou-se por considerar para rigidez k do modelo a rigidez secante observada no ensaio para uma força igual a 40% da força máxima, obtendo-se:

$$k = \frac{0,4F_{m\acute{a}x}}{\delta_{0,4}} \quad (8)$$

Considerando de seguida que:

$$W_1 = \frac{F_{ced} \times \delta_1}{2} \quad e \quad W_2 = F_{ced} \times (\delta_2 - \delta_1) \quad (9)$$

$$\delta_1 = \frac{F_{ced} \times \delta_{0,4}}{0,4F_{m\acute{a}x}} \quad (10)$$

$$W_{total} = W_1 + W_2 \quad (11)$$

Onde W_{total} é a energia de deformação ocorrida durante o ensaio até à força máxima, obtida por integração numérica do gráfico força-deslocamento do ensaio da ligação.

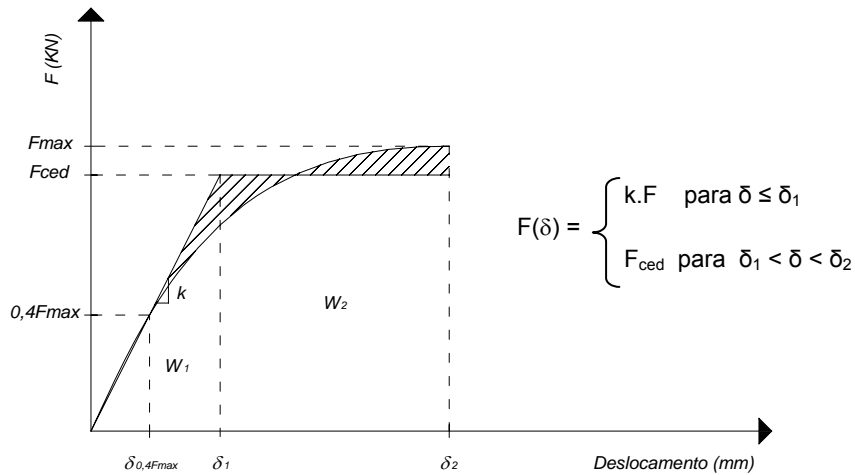


Figura 6: Modelo Elasto-plástico Equivalente.

Substituindo (10) em (9), vem:

$$W_1 = F_{ced}^2 \times \frac{\delta_{0,4}}{2 \times 0,4 F_{máx}} \quad \text{e} \quad W_2 = F_{ced} \times \delta_2 - F_{ced}^2 \times \frac{\delta_{0,4}}{0,4 F_{máx}} \quad (12)$$

Substituindo (12) em (11), vem:

$$W_{total} = F_{ced} \times \delta_2 - \frac{1}{2} F_{ced}^2 \times \frac{1}{k} \quad (13)$$

Ou seja

$$F_{ced} = k \times \delta_2 - \sqrt{(k \times \delta_2)^2 - 2 \times k \times W_{total}} \quad (14)$$

O Modelo Elasto-plástico Equivalente tem um primeiro troço elástico-linear com rigidez k , e valor máximo em (δ_1, F_{ced}) , e um segundo troço horizontal com deslocamentos a variar entre δ_1 e δ_2 (Figura 6).

Ligação V20 (referência)

A ligação V20 corresponde aos varões de 20 mm de diâmetro com um comprimento de embebimento de 20 cm betonados conjuntamente com o betão. Trata-se da ligação de referência com a qual se irão comparar as restantes. Na Figura 7 apresenta-se o diagrama força-deslocamento bem como a curva média do Modelo Elasto-plástico. A rotura é tipicamente do tipo 2, isto é, pela ligação entre o betão e o varão, como se pode observar na Figura 7.

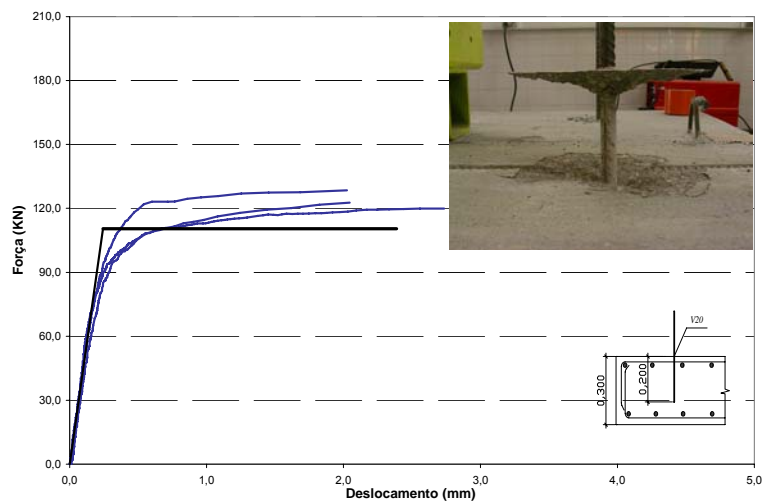


Figura 7: Diagrama força-deslocamento e rotura da ligação V20.

Ligações L20 e LC20

Apesar de serem diferentes, estas duas ligações são analisadas em conjunto porque ambas têm o mesmo tipo de rotura. A diferença entre elas é a cintagem da ligação LC20, a qual não teve influência significativa na rotura, pois esta ocorre pela ligação entre a bainha de aço e o grout (rotura tipo 5), (Figura 9). Neste tipo de ensaio o tubo metálico é liso e a rotura ocorre para pequenos valores de força de tração, como se pode observar nos diagramas força deslocamento das Figuras 8 e 9.

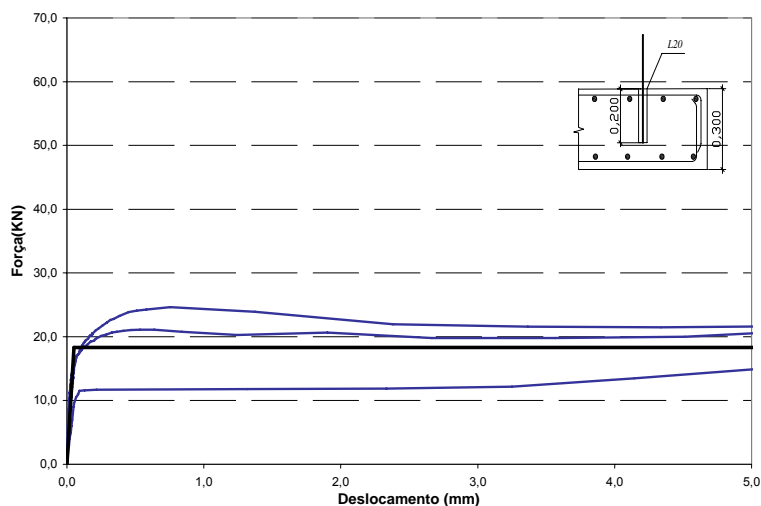


Figura 8: Diagrama força-deslocamento da ligação L20.

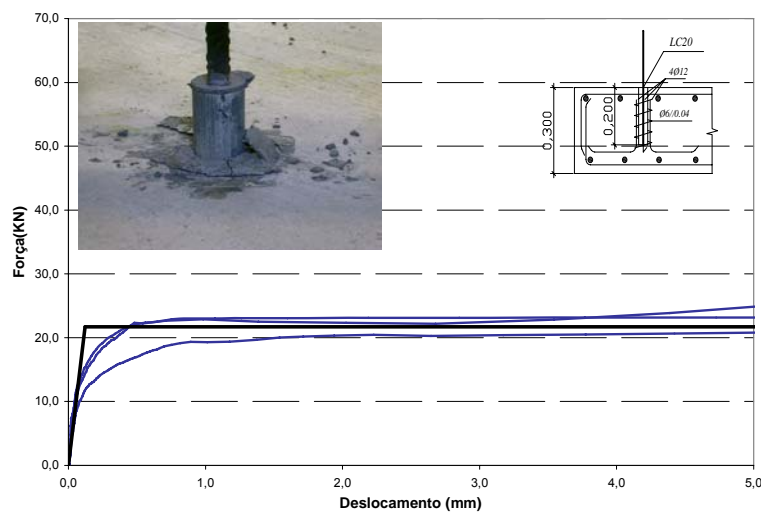


Figura 9: Diagrama força-deslocamento e rotura da ligação LC20.

Ligação P10

Na figura 10 apresenta-se o diagrama força - deslocamento obtido no ensaio da ligação P10. Verificou-se a delaminação do recobrimento na zona circundante à ligação, como se pode observar na Figura 10. Trata-se de uma rotura do tipo 3.

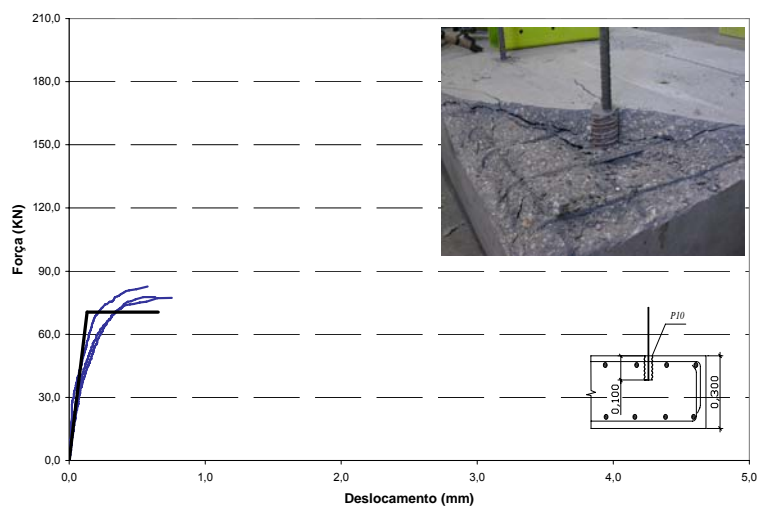


Figura 10: Diagrama força-deslocamento e rotura da ligação P10.

Ligação P15

Na Figura 11 apresenta-se o diagrama força - deslocamento da ligação P15. Após a rotura, a ligação ficou com o aspecto que se observa na Figura 11. Trata-se, portanto, de uma rotura do tipo 3.

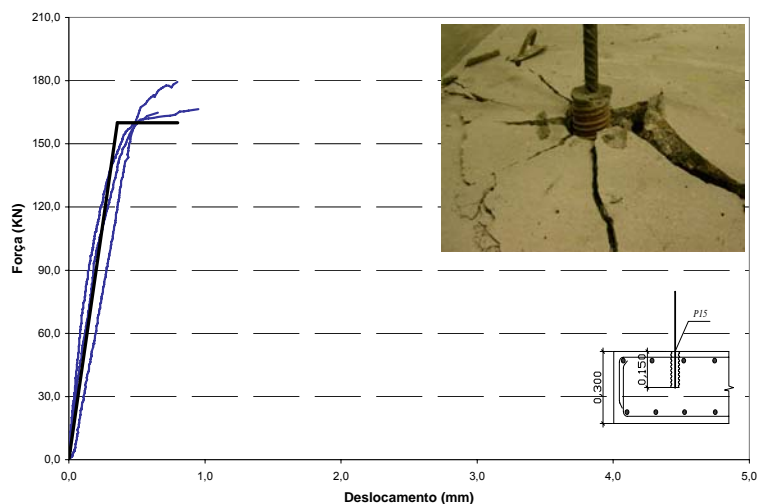


Figura 11: Diagrama força-deslocamento e rotura da ligação P15.

Ligação P20

A rotura neste tipo de ligação ocorreu para valores próximos da tensão de cedência do aço. Na Figura 12 apresenta-se o diagrama força - deslocamento da ligação. A rotura é um mecanismo complexo, tendo-se começado por formar fissuras radiais na superfície do betão que deram origem a um cone de rotura. Nos primeiros dois terços do comprimento de embebedimento a rotura ocorre na ligação entre a bainha e o betão circundante, enquanto no último terço ocorre entre o aço e o grout. Também neste caso, e após o início da cedência do aço (caso 1), se deu a rotura pelo betão (caso 3).

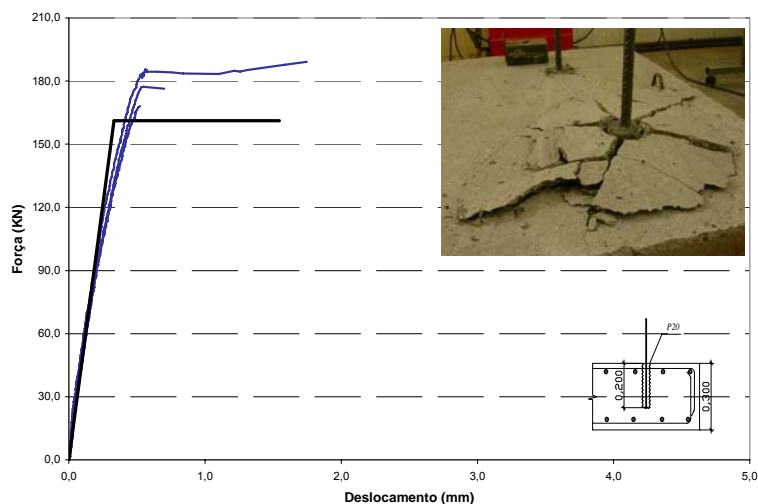


Figura 12: Diagrama força-deslocamento e rotura da ligação P20.

Ligação P25

Na ligação P25 o comprimento de embebição é de 25 cm o que implicou um acréscimo de resistência na ligação, tendo a rotura ocorrido pela armadura. Na Figura 13 apresenta-se o diagrama força - deslocamento da ligação P25. A ligação P25 após o ensaio apresenta apenas uma pequena delaminação da camada superficial de betão e algumas fissuras tangenciais, como se mostra na Figura 13. Trata-se de uma rotura por cedência das armaduras.

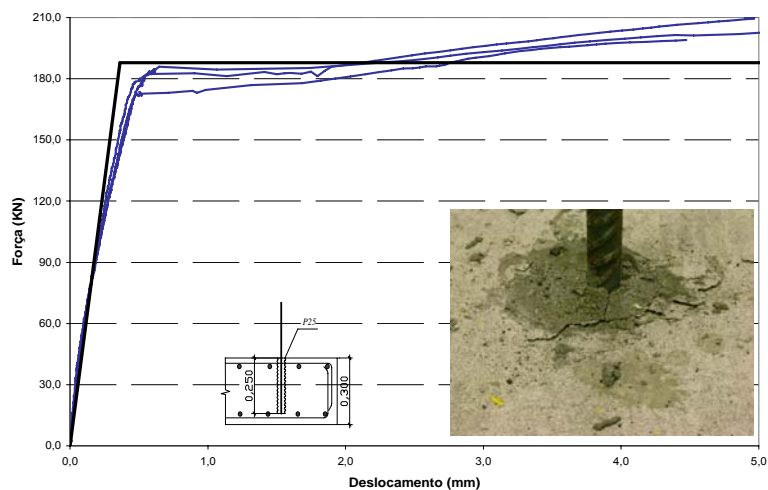


Figura 13: Diagrama força-deslocamento e rotura da ligação P25.

Ligação PC20

A diferença entre esta ligação e a ligação P20 é a adição de cintagem. Como resultado da cintagem houve um acréscimo de resistência da ligação e a rotura deu-se claramente por cedência da armadura. Na Figura 14 apresenta-se o diagrama força - deslocamento da ligação. A ligação após o ensaio apenas apresenta uma pequena delaminação da camada superficial de betão e algumas fissuras radiais, como se pode observar na Figura 14.

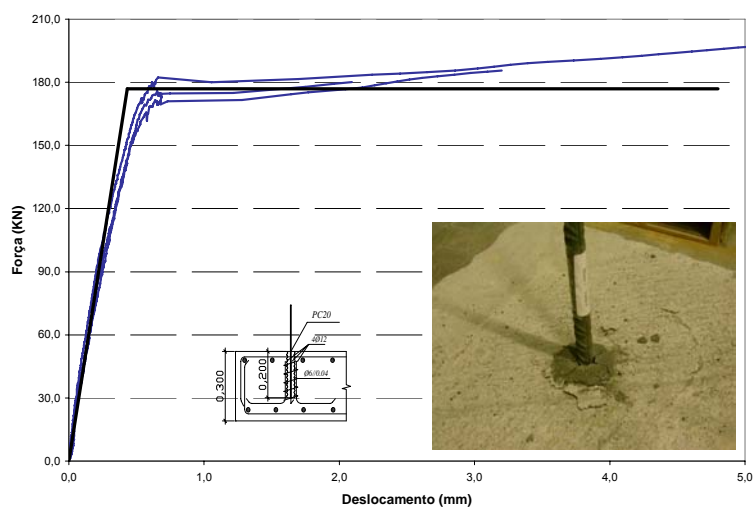


Figura 14: Diagrama força-deslocamento e rotura da ligação PC20.

Ligação CM20

A ligação CM20 corresponde à situação em que se realizou um furo de 52 mm de diâmetro com 20 cm de comprimento, com posterior selagem da armadura com grout. Na Figura 15 apresenta-se o diagrama força - deslocamento da ligação. A rotura, deu-se entre o grout e o varão de aço, isto é, uma rotura tipo 2.

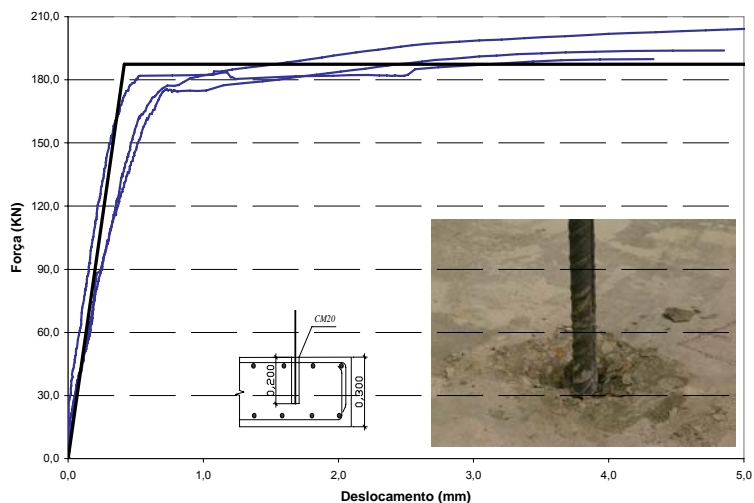


Figura 15: Diagrama força-deslocamento e rotura da ligação CM20.

6. Análise dos resultados

No quadro 4 sintetizam-se os resultados dos ensaios. Apresentam-se os valores da força máxima ($F_{m\acute{a}x}$), o deslocamento correspondente à força máxima (δ_2), a força de cedência do Modelo Elasto-plástico Equivalente (F_{ced}), e o deslocamento correspondente à força de cedência equivalente (δ_1).

Quadro 4: Resultados dos ensaios experimentais (valores médios)

Modelo de Ensaio	$F_{m\acute{a}x}$ (KN)	$\delta_{2,F_{m\acute{a}x}}$ (mm)	F_{ced} (KN)	$\delta_{1,F_{ced}}$ (mm)
V20	124,05	2,39	110,46	0,24
L20	19,24	5,27	18,31	0,05
LC20	23,05	5,31	21,74	0,12
P10	79,27	0,65	70,50	0,13
P15	170,21	0,80	160,04	0,36
P20	182,99 ⁽¹⁾	1,54	161,20	0,33
P25	206,89 ⁽¹⁾	5,60	187,92	0,36
PC20	191,87 ⁽¹⁾	4,80	176,91	0,43
CM20	196,76 ⁽¹⁾	5,20	187,38	0,42

(1) Ensaios em que a força máxima da ligação é superior à força de cedência do aço.

Na Figura 16 apresentam-se os Modelos Elasto-plástico Equivalentes ao comportamento das ligações ensaiadas. Os gráficos correspondem aos valores médios de conjuntos de três

ligações do mesmo tipo. Consta-se que as ligações com bainha em tubo de aço liso (L20 e LC20) apresentam um mau desempenho, o mesmo acontecendo com a ligação P10, realizada com bainha de pré-esforço com 10 cm de embebedimento. Pelo contrário, os melhores desempenhos de todas as ligações estudadas, em termos de resistência, foram obtidos com ligações com bainha de pré-esforço com 20 cm ou mais de embebedimento (P20, P25, e PC20) e com a ligação CM20, realizada através de um furo executado com carotadeira. Nestes casos, a varão de aço atingiu a cedência, razão pela qual a ligação apresentou uma maior ductilidade. Consta-se também que a ductilidade das ligações em que não houve cedência das armaduras é muito reduzida.

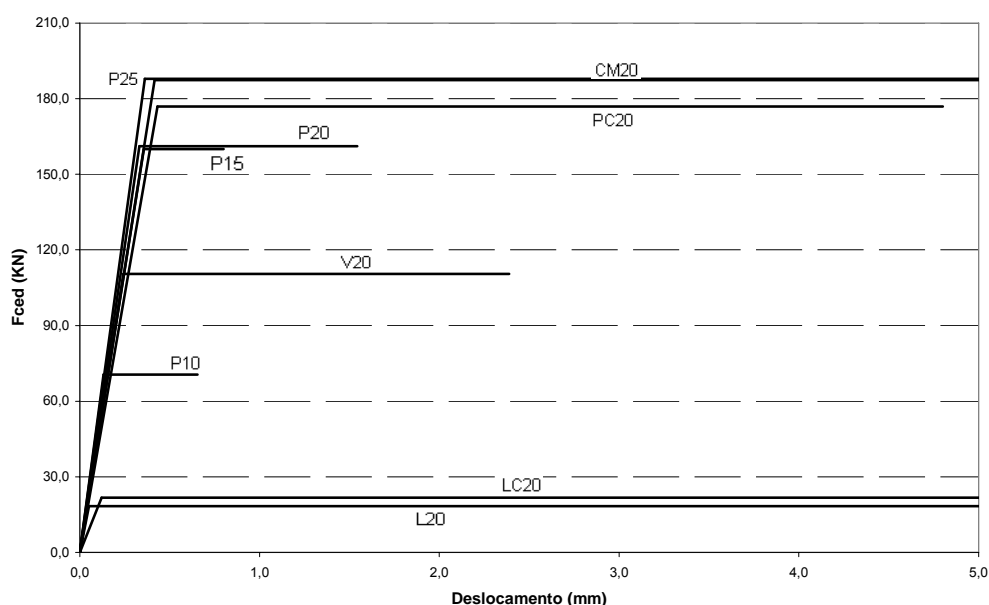


Figura 16: Diagramas dos Modelos Elasto-plástico Equivalentes das ligações.

No Quadro 5 comparam-se os resultados experimentais com as estimativas da resistência obtidas com as expressões (1) a (6). Neste Quadro, para determinação de f_{bm} e $f_{bm,grout}$ foi usada a EN1992.1.1 [8], a qual considera a influência da fendilhação no valor da tensão de aderência aço-betão. Note-se que a tensão de aderência dada pela norma aplica-se exclusivamente a aços nervurados. Usou-se a liberdade de utilizar a mesma tensão de aderência, calibrada para varões com uma geometria de nervuras pré-definida, nas bainhas de pré-esforço (ligações P).

Quadro 5: Comparação dos resultados experimentais com as estimativas da resistência obtidas com as expressões (1) a (6).

		Modos de rotura								
		Pelo aço (1)	Grout-varão (2) ou betão-varão (3)			Com forma cónica pelo betão (4)		Bainha-betão (6)		
Modelo de Ligação	F_{ced} (KN)	$F_{R,1}$ (kN)	$f_{bm,grout}$ ou f_{bm} (MPa)	$F_{R,2}$ ou $F_{R,3}$ (kN)	F_{ced} ou $F_{R,3}$	$F_{R,4}$ (kN)	F_{ced} ou $F_{R,4}$	f_{bm} (MPa)	F_R (kN)	F_{ced} ou $F_{R,6}$
V20	110.5	170.8	5.8	<u>72.5</u> ⁽³⁾	1.52	203.1				
L20	18.3	170.8	12.8	160.9 ⁽²⁾		181.0				
LC20	21.7	170.8	12.8	160.9 ⁽²⁾		181.0				
P10	70.5	170.8	12.8	80.5 ⁽²⁾		<u>71.8</u>	0.98	4.6	75.4	
P15	160.0	170.8	12.8	120.7 ⁽²⁾		<u>129.5</u>	1.24	4.5	<u>109.5</u>	1.46
P20	161.2	170.8	12.8	160.9 ⁽²⁾		208.9		4.8	<u>158.4</u>	1.02
P25	187.9	<u>170.8</u>	12.8	201.2 ⁽²⁾		278.6		4.5	182.5	
PC20	176.9	<u>170.8</u>	12.8	160.9 ⁽²⁾	1.10	208.9		4.8	158.4	
CM20	187.4	<u>170.8</u>	12.8	160.9 ⁽²⁾	1.16	206.2				

Nas ligações P25, PC20 e CM20, o comportamento na rotura foi claramente condicionado pela cedência do aço. A resistência da ligação V20 excedeu o valor da norma para a resistência da aderência entre o aço e o betão, eventualmente por não existirem fendas a atravessar a ligação. De acordo com Eligehausen et al [4] a fendilhação reduz em 40% a 50% a resistência da ligação.

Dado o reduzido comprimento de embebedimento da ligação P10, a rotura foi claramente pelo betão com a formação da superfície de rotura cónica característica. Esta rotura é bastante frágil e o valor da sua resistência é estimado de forma razoável pela expressão (4). No caso da ligação P15, o resultado experimental excedeu a resistência estimada para a rotura pelo betão e pela aderência entre a bainha e o betão. Supõe-se que rotura tenha sido mista. Na ligação P20, a expressão (6) estima, com rigor considerável, o valor da rotura por aderência entre a bainha e o betão, embora no ensaio tenha sido observada uma rotura pelo betão.

A resistência da ligação PC20 excedeu a da ligação P20 devido à cintagem do betão em redor da ligação. Como já se referiu, a rotura deu-se por cedência do aço.

É de realçar o facto de a ligação CM20 conduzir a uma resistência bastante superior à da ligação de referência V20, apesar desta última ser uma ligação directa aço-betão. Para este facto contribui a superior resistência do grout. A resistência observada excedeu a resistência estimada para a rotura por aderência entre o varão e o grout, provavelmente por o betão não se encontrar fendilhado na zona da ligação.

Para as ligações L20 e LC20, cuja rotura se deu por deslizamento na interface bainha-betão, não é fácil justificar a sua baixa resistência. A tensão de contacto nesta interface, na rotura, é cerca de 0.6 MPa, que corresponde a um valor muito baixo. Pode-se concluir que este tipo de ligações não é recomendável.

7. Conclusões

No presente trabalho foram estudadas oito soluções diferentes de ligações para as armaduras do pilar à fundação, tendo sido realizados ensaios monotónicos, para analisar o seu comportamento.

Deste estudo, constata-se que é desaconselhável a utilização de bainhas lisas embebidas em betão, semelhantes às das ligações L20 e LC20.

Verificou-se que a melhor solução de ligação foi aquela em que se utilizaram bainhas de pré-esforço e que a sua resistência é melhorada quando a ligação é cintada.

Neste estudo constatou-se que a utilização de varões de aço selados à posteriori através de um furo, executado com carotadeira, apresentam um bom desempenho comparativamente com o varão embebido directamente no betão. O que quer dizer que o grout garante uma melhor aderência que o betão original.

Após este estudo constata-se que nenhuma das ligações estudadas apresenta ductilidade significativa na rotura, a não ser aquelas ligações em que a rotura se deu pelo aço.

As expressões 3 a 7, usadas para quantificar a resistência das ligações à tracção simples, poderão apenas dar valores indicativos para o caso de ligações com bainhas metálicas, pois foram calibradas para varões selados com grout e não para aquele tipo de ligações. Para o caso de ligações com bainhas metálicas será necessário efectuar mais ensaios para analisar os diferentes parâmetros envolvidos e obter expressões apropriadas.

Existem parâmetros cuja importância na resistência deste tipo de ligações, em nosso entender, não está completamente estudada, designadamente: a existência de armaduras horizontais na face superior da fundação e a espessura do seu recobrimento (o qual tem um valor significativo no caso das fundações); a influência do estado de tensão do varão na resistência da ligação; o diâmetro do furo e da bainha; e o efeito positivo da cintagem da ligação. Um outro aspecto importante em zonas sísmicas é quantificar a degradação da ligação quando sujeita a acções dinâmicas [4].

No entendimento dos autores, é importante determinar a resistência dos diferentes modos de rotura da ligação para a dimensionar para que a rotura seja condicionada pelo comportamento do aço em cedência, isto é, a resistência da ligação (expressões (2) a (7)) deve ser sempre superior à resistência da armadura (expressão (1)), garantindo assim uma rotura dúctil da ligação pilar-fundação.

AGRADECIMENTOS

À Secil Prébetão pelo fornecimento dos blocos de betão e das armaduras utilizados nos ensaios, à Hilti Portugal, pelo fornecimento de coroas diamantadas para execução de furos nos maciços de betão e à Sika pelo fornecimento do grout.

REFERÊNCIAS

- [1] Silva, A.M.S.; “Ligações entre elementos pré-fabricados de betão”; *Dissertação de Mestrado*, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 1998.
- [2] Lúcio, V. J. G.; Silva, A. M. S.; “Design and detailing of footings for precast concrete structures”; *The second International Symposium on Prefabrication*, Helsinquia, 2000.
- [3] “Guidelines for the Use of Structural Precast Concrete in Buildings”; New Zealand Concrete Society and New Zealand National Society for Earthquakes Engineering, 1992.
- [4] Eligehausen, R.; Simons, I.; Kretschmar, M.; “Behaviour of Post-installed Rebars under Reversed Cyclic Loading”; fib, *Proceedings of the 2nd International Congress*, Naples, 2006.
- [5] Design of Fastenings in Concrete; CEB Bulletin D’Information nº 226, Thomas Telford, Londres, 1995.
- [6] Matthew Miltenberger, P.E.; “Capacity design of grouted anchors”; *16th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, Washington, DC, USA, 2001.
- [7] Kunz, J., Muenger F.; “Splitting and Bond Failure of Post-Installed Rebar Splices and Anchorings”; *Bond in Concrete*. fib, Budapest, 2002.
- [8] Eurocode – 2: Design of Concrete Structures – Part 1-1: General rules for buildings. CEN EN 1992-1-1, Abril de 2004.