

## PILARES DE BETÃO ARMADO REFORÇADOS COM LAMINADOS DE FIBRAS DE CARBONO



**JOAQUIM BARROS**  
Prof. Auxiliar  
DEC-UM



**DÉBORA FERREIRA**  
Assistente 1º Triénio  
ESTIG-IPB



**PAULO LOURENÇO**  
Prof. Auxiliar  
DEC-UM

### SUMÁRIO

Neste trabalho apresentam-se os resultados obtidos nos primeiros ensaios cíclicos com elementos de pilar de betão armado. Estes ensaios fazem parte de um projecto de investigação experimental e numérica relativo ao comportamento de pilares de betão armado reforçados com materiais de matriz polimérica reforçados com fibras de carbono.

### 1. INTRODUÇÃO

Na última década os convencionais sistemas de reforço para pilares têm vindo a ser substituídos por materiais compósitos de fibras de carbono e de vidro, dado o elevado valor dos factores resistência/peso e rigidez/peso, e dada a elevada resistência à corrosão, leveza, durabilidade e facilidade de aplicação destes materiais [1-6]. Recentemente [7] foi proposta a aplicação de tiras de laminado de fibras de carbono, com secção transversal de  $10 \times 1.4 \text{ mm}^2$ , no reforço à flexão de pilares. Este tipo de reforço associa os benefícios da rapidez de execução do reforço à economia de material, sendo significativo o aumento da resistência à flexão. Todavia, o confinamento do betão é praticamente inalterado, pelo que este benefício, tão indispensável em elementos verticais sujeitos a acções dinâmicas, não é garantido neste tipo de reforço.

No presente trabalho propõem-se sistemas de reforço para pilares com modos de roturas à flexão e flexão-corte, que associem economia de aplicação com elevados níveis de desempenho estrutural. Neste trabalho apenas são analisados ensaios experimentais efectuados com pilares que cedem por flexão, fazendo parte da 1ª fase de um projecto de investigação relativo à aplicação de materiais compósitos no reforço de pilares de betão armado. Os resultados preliminares são apresentados e analisados.

## 2. SISTEMAS PARA REFORÇO DE PILARES

Na Figura 1 representa-se o reforço que se propõe para pilares com modos de rotura por flexão. As tiras de laminado de fibras de carbono são inseridas em ranhuras efectuadas no betão de recobrimento. Os laminados são fixos ao betão por intermédio de uma épxoi introduzida nessas ranhuras. Este tipo de reforço é o analisado no presente trabalho, constituindo a primeira série de ensaios do projecto de investigação em curso.

Nos pilares da segunda série de ensaios (Figura 2), as tiras de laminado de fibras de carbono serão envolvidas por faixas de tecido de fibras de carbono com módulo de elasticidade de 240 GPa, de largura,  $b$ , e afastamento,  $s$ . As grandezas  $b$  e  $s$  serão definidas em função das características geométricas e materiais da peça a reforçar e das acções actuantes. As faixas de tecido de fibras de carbono introduzem um acréscimo significativo de resistência ao corte e de confinamento ao betão. Além disto, diminuem o comprimento de encurvadura das tiras de laminado de fibras de carbono, contribuindo para uma maior eficácia dos laminados dispostos nas faces solicitadas à compressão. Comparativamente com as soluções convencionais de encamisamento completo [8], e para um nível semelhante de desempenho estrutural, prevê-se uma diminuição nos custos afectos aos materiais e ao tempo necessário à aplicação do reforço.

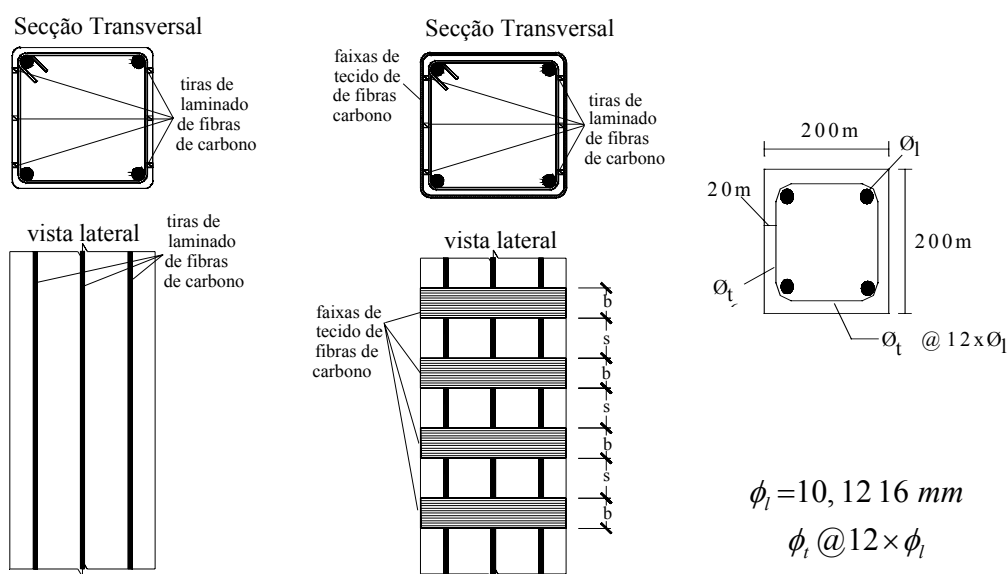


Figura 1: Reforço à flexão    Figura 2: Reforço à flexão e corte    Figura 3: Secção transversal

## 3 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

### 3.1 Introdução

Este trabalho refere-se à campanha de ensaios efectuados com elementos de pilar reforçados com três correntes percentagens de armaduras convencionais, conforme se indica na Figura 3.

O afastamento entre cintas é o recomendado pelo REBAP. A armadura convencional utilizada nos elementos de pilar tem propriedades materiais e geométricas idênticas às armaduras aplicadas nos anos 60 e 70 nas estruturas de betão armado.

A Figura 4 representa esquematicamente a campanha de ensaios a serem realizados. Esta campanha é constituída por quatro série de ensaios sobre elementos de pilar reforçados com três percentagens de armaduras longitudinais, sendo ensaiados dois provetes por cada percentagem, constituindo um total de 30 ensaios em 18 provetes. Para avaliar o efeito da armadura convencional, quer sob acções monotónicas quer sob acções cíclicas, serão efectuados ensaios monotónicos e cíclicos (séries de ensaios E1 e E2), constituindo um total de  $3 \times 2 \times 2 = 12$  ensaios em 12 provetes. Para avaliar o efeito do reforço proporcionado pelas tiras de laminado de fibras de carbono serão efectuados ensaios cíclicos com elementos de pilar previamente reforçados com os referidos laminados. Estes ensaios designam-se de E3 e constituem um conjunto de  $3 \times 2 = 6$  ensaios em 6 provetes. Após terem sido ensaiados, os 6 provetes da série E1 serão reforçados com laminados de fibras de carbono. Estes provetes serão novamente ensaiados monotonicamente, constituindo a série E4 com  $3 \times 2 = 6$  ensaios. Após terem sido ensaiados, os 6 provetes da série E2 serão reforçados com laminados de fibras de carbono, e serão novamente ensaiados ciclicamente, constituindo a série E5 com  $3 \times 2 = 6$  ensaios.

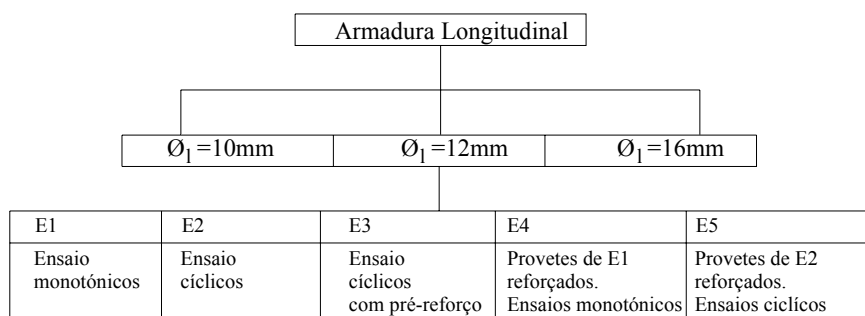


Figura 4: Plano de ensaios

### 3.2 Equipamento

Na Figura 5 apresenta-se o esquema do sistema de ensaio. O provete constituído pelo pilar ligado monoliticamente à fundação é fixado ao bloco de fundação por intermédio de 4 varões roscados. O actuador de tracção/compressão que aplica a força horizontal tem capacidade de carga máxima de 100 kN. Na extremidade do pistão deste actuador foi fixada uma célula de carga de tracção/compressão de 250 kN de capacidade máxima de carga, com 0.05% de precisão (Figura 6). Entre a célula e a cabeça do pilar foi aplicado um sistema de rótula espacial, de forma a manter o ponto de aplicação da carga e evitar a introdução de esforços não desejados no actuador (ver Figura 6). Uma força de compressão aproximadamente constante de 150 kN é aplicada ao elemento de pilar por intermédio de um actuador de 250 kN de capacidade máxima de carga, fixado ao bloco de fundação por meio de dois cabos diwidag (ver Figuras 7 e 9). Esta força é medida por intermédio de uma célula de carga de 500 kN de

capacidade máxima de carga e 0.7% de precisão, introduzindo uma tensão de compressão no pilar de 3.75 MPa.

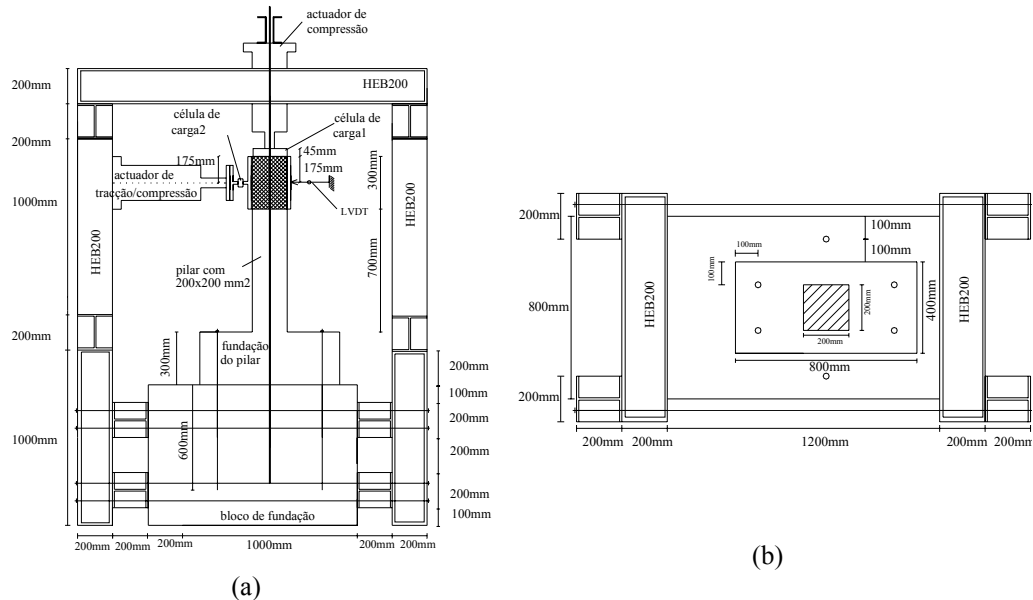


Figura 5: Esquema do sistema de ensaio: a) vista lateral, b) Vista em planta.

Para medir a deformabilidade do elemento de pilar foram dispostos transdutores de deslocamento de acordo com o esquema representado na Figura 8. Nesta figura também se assinala a posição dos extensómetros (6 mm de grelha), a serem aplicados nos laminados de fibras de carbono para medirem o estado de extensão nestes. A Figura 9 inclui uma foto do sistema de ensaio. O carregamento é controlado por um transdutor de deslocamentos de 50 mm de campo, com 0.05% de precisão, aplicado ao nível do actuador que introduz a força horizontal no elemento de pilar (LVDT1, ver Figuras 8 e 9). A velocidade de deformação é próxima de 9 mm por minuto. O ensaio é controlado por um equipamento que tem vindo a ser desenvolvido nos últimos anos [9].

Simulações numéricas preliminares [10] relativas ao comportamento dos pilares indicaram que no momento da cedência das armaduras longitudinais a flecha da cabeça do pilar deveria ser da ordem dos 5 mm, pelo que o carregamento cíclico aplicado nos ensaios experimentais é o representado na Figura 10. Assim, o deslocamento máximo no transdutor de controlo do ensaio será próximo de 5 vezes o deslocamento correspondente ao início da cedência do aço, por forma a introduzir significativos danos no betão da zona da rótula plástica.

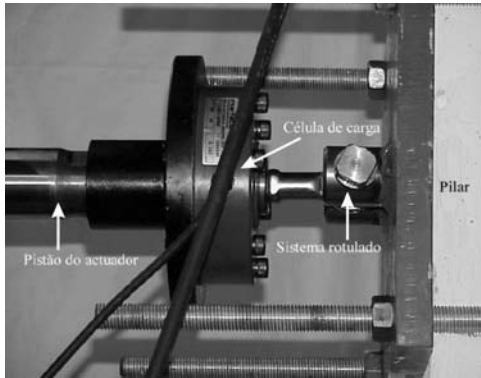


Figura 6: Sistema rotulado aplicado entre o actuador e a cabeça do prövette

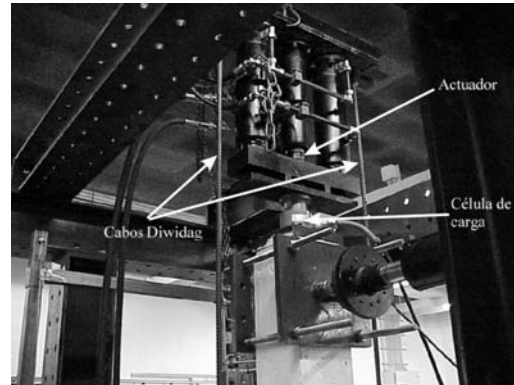


Figura 7: Sistema de fixação do actuador que aplica a força de compressão no pilar

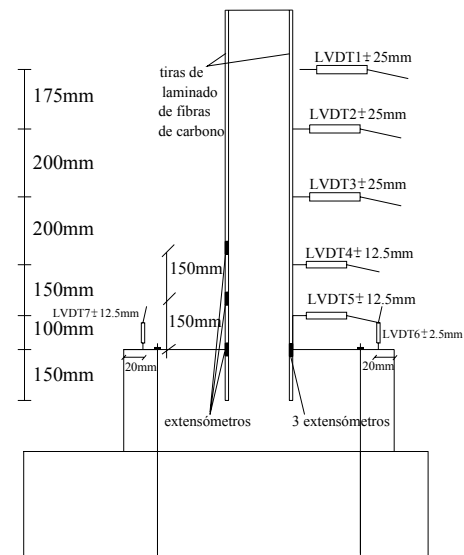


Figura 8: Transdutores de deslocamentos e extensômetros aplicados



Figura 9: Sistema de ensaio

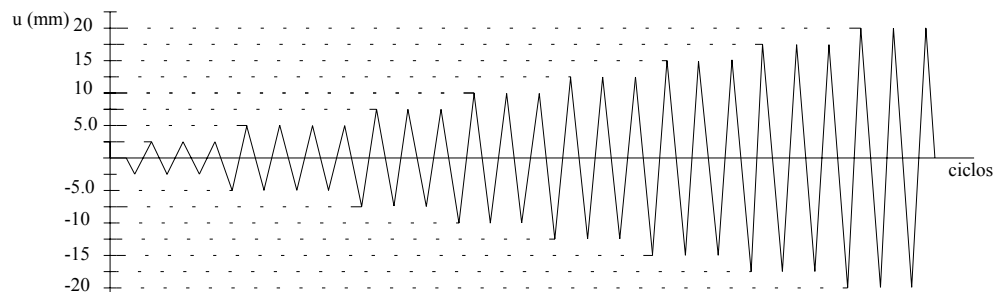


Figura 10: Ciclos de carga a aplicar nos ensaios

### 3.3 Materiais

#### 3.3.1 Betão

Dado que um dos objectivos principais do presente projecto de investigação é desenvolver e analisar sistemas de reforço, técnica e economicamente vantajosas para reforço de pilares de edifícios construídos nas décadas de 60 e 70, o betão dos provetes a ensaiar deve ser, o mais possível, semelhante ao empregue naquelas estruturas. Nessas décadas o betão utilizado na construção de edifícios era, geralmente, de classe B15 e B20. O betão destas estruturas que não sofreu danos consideráveis poderá ter actualmente uma resistência substancialmente superior à sua resistência na altura da construção. Contudo, é provável que o betão destas estruturas apresente algum grau de deterioração, pelo que no presente projecto optou-se por um betão com resistência à compressão próxima dos 16 MPa aos 28 dias (C12/20), com a composição apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição do betão dos elementos de pilar/sapata (kg/m<sup>3</sup>)

| <b>Cimento Secil 32.5 II</b> | <b>Brita 5-15</b> | <b>Areia (0-5)</b> | <b>Água</b> |
|------------------------------|-------------------|--------------------|-------------|
| 250.0                        | 1196.5            | 797.5              | 151.5       |

A resistência à compressão foi aferida aos 28 dias e à data dos ensaios sobre os elementos de pilar. A resistência a essas datas foi obtida por intermédio de ensaios de compressão uniaxial sobre dois provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Em cada amassadura foram também preparados dois provetes prismáticos com dimensões de 850×100×100 mm<sup>3</sup> para avaliar a resistência à tracção em flexão e o comportamento após fendilhação do betão. Na Tabela 2 incluem-se os resultados obtidos aos 28 dias.

Tabela 2 – Resistência do betão à compressão e à tracção em flexão, aos 28 dias

| <b>Compressão</b>   | <b>Flexão</b>  |
|---|--|
| Média = 16.66 MPa<br>Desvio padrão = 3.31 MPa<br>Coeficiente de variação = 0.20 | Média = 2.62 MPa<br>Desvio padrão = 0.48 MPa<br>Coeficiente de variação = 0.18 |

#### 3.3.2 Armaduras convencionais

Os elementos de pilar foram armados com varões de aço com propriedades mecânicas e geométricas semelhantes às dos varões utilizados nas décadas de 60 e 70 (Aço A24). Os varões utilizados nos elementos de pilar foram ensaiados numa prensa servo-controlada da marca Instron série 4400, seguindo as recomendações da norma NP EN 10002. Os resultados incluídos na Tabela 3 são a média dos obtidos com três provetes. As relações típicas tensão-extensão registadas nas séries de provetes  $\phi 6$  e  $\phi 10$  estão apresentadas na Figura 11. A forma da relação tensão-extensão registada nos aços  $\phi 12$  e  $\phi 16$  é semelhante à registada no aço  $\phi 10$ .

Tabela 3 – Propriedades armaduras convencionais à tracção uniaxial

| Diâmetro do varão (mm) | $f_{sy}$ (MPa) | $f_{su}$ (MPa) | $\epsilon_{su}$ (mm/mm) | $E_s$ (GPa) |
|------------------------|----------------|----------------|-------------------------|-------------|
| 6                      | 352.4          | 352.8          | 0.23                    | 203.7       |
| 10                     | 323.3          | 456.5          | 0.17                    | 217.0       |
| 12                     | 364.8          | 518.8          | 0.20                    | 229.7       |
| 16                     | 361.6          | 475.0          | 0.13                    | 226.9       |

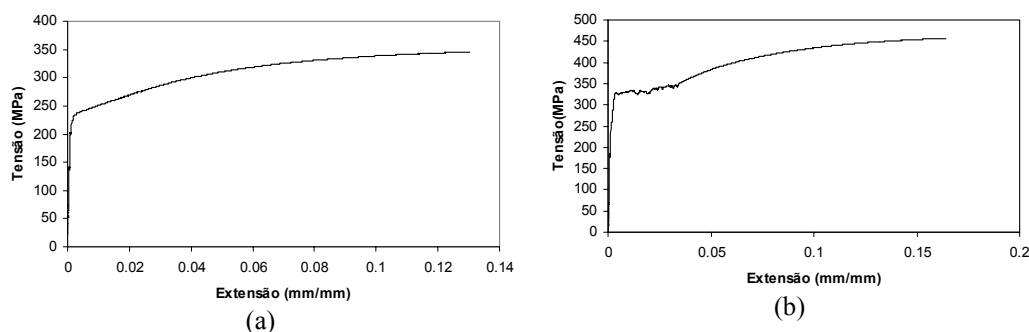


Figura 11: Relações típicas tensão-extensão nas armaduras convencionais  $\phi 6$  (a) e  $\phi 10$  (b)

### 3.3.3 Laminados de fibras de carbono

As tiras de laminado de fibras de carbono aplicadas no reforço dos pilares foram cedidas pela empresa S&P. Estas tiras são fornecidas em rolos e têm uma secção de 10 mm de largura por 1.4 mm de espessura. Segundo o fabricante, este material compósito desenvolve um módulo de elasticidade da ordem dos 150 GPa e uma resistência à tracção próxima dos 1500 MPa [11]. Os valores destas propriedades no material fornecido foram determinados por intermédio de ensaios de tracção uniaxial com provetes de 231 mm de comprimento, efectuados em prensa servo-controlada da marca Instron, série 4208. O módulo de elasticidade foi determinado por intermédio de um extensómetro (clip-gauge) fixado na parte central do provete, com um campo de leitura de 50 mm. O ensaio foi efectuado com uma velocidade de 1 mm por minuto. Os resultados obtidos estão incluídos na Tabela 4. Constata-se que o módulo de elasticidade e a tensão máxima são ligeiramente superiores aos valores indicados pelo fabricante.

Tabela 4 – Propriedades das tiras de laminado de fibras de carbono

| Carga máxima (kN) | Tensão máxima (MPa) | Extensão à tensão máxima (mm/mm) | Tensão mínima de cedência (MPa) | Módulo de elasticidade* (GPa) | Módulo de elasticidade (GPa) |
|-------------------|---------------------|----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 22.74             | 1596                | 0.0265                           | 1460                            | 150.4                         | 160.9                        |
| 22.19             | 1550                | 0.0261                           | 1424                            | 145.9                         | 156.5                        |

\* Módulo de elasticidade obtido entre dois pontos escolhidos previamente.

#### 4 RESULTADOS PRELIMINARES DOS ENSAIOS SOBRE ELEMENTOS DE PILAR

Na Figura 12 representa-se a relação entre a força horizontal e o deslocamento no transdutor de controlo (LVDT1, ver Figura 8), no ensaio cíclico efectuado com um elemento de pilar reforçado com armaduras longitudinais de 10 mm de diâmetro.

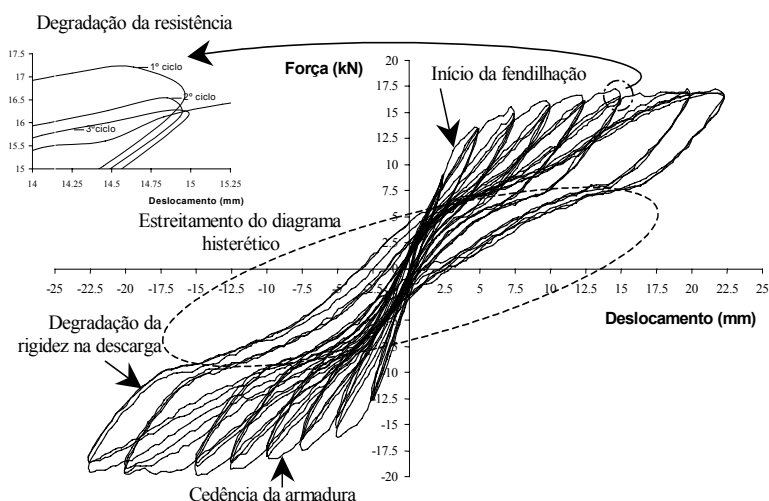


Figura 12: Relação força horizontal-deslocamento correspondente num elemento de pilar reforçado com  $\phi_r=10$  mm

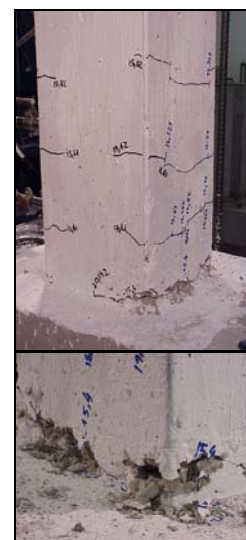


Figura 13: Danos na zona da rótula plástica

Verifica-se que a entrada em cedência das armaduras ocorre para flechas entre 5 a 10 mm. O diagrama da Figura 12 revela a degradação da resistência, a degradação da rigidez na descarga e um estreitamento pronunciado do diagrama histerético. O início precoce da fase de estreitamento evidencia que as fendas da zona da rótula plástica desenvolveram considerável abertura e que ocorreram escorregamentos significativos entre a armadura longitudinal e o betão envolvente. Na Figura 13 incluem-se fotos mostrando os danos ocorridos na zona da rótula plástica, no final do ensaio. O comportamento do elemento de pilar não foi perfeitamente simétrico, tendo a força máxima de compressão (movimento do pilar no sentido m1, ver Figura 9) sido da ordem dos 20 kN, enquanto a força máxima de tracção foi de 17 kN. A resposta não simétrica em termos de capacidade de carga ocorreu também no pilar reforçado com armaduras longitudinais de 12 mm de diâmetro, conforme se pode constatar na Figura 14, em que se representa a relação entre a força horizontal e o deslocamento correspondente (LVDT1). Neste pilar a força máxima de tracção e de compressão foi de 26 e 30 kN, respectivamente. Neste último ensaio verificou-se a ocorrência de deformações residuais somente no sentido da força de tracção (m2, ver Figura 9), o que, apesar de ser possível, não era esperado. Antes de se proceder à execução dos restantes ensaios desta série, estas situações serão analisadas por forma a verificar-se se se trata de deficiências geométricas ou materiais na fabricação dos pilares ou de condicionantes do sistema de ensaio.



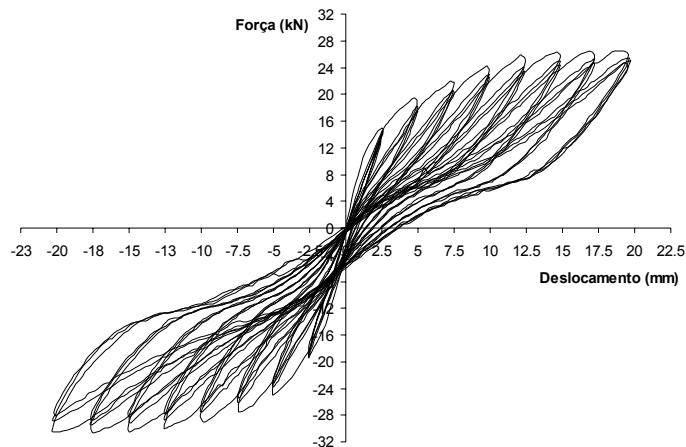


Figura 14: Relação força horizontal-deslocamento correspondente num elemento de pilar reforçado com  $\phi_r=12$  mm

## 5 PROCEDIMENTOS DE REFORÇO

O procedimento de reforço a aplicar nos elementos de pilar ensaiados está esquematicamente representado na Figura 15.

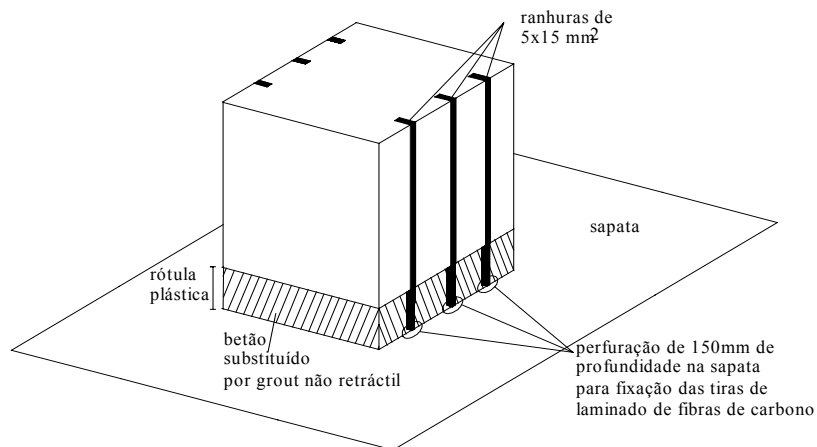


Figura 15: Reforço dos pilares

Na zona da rótula plástica, com comprimento que varia entre os 50 e os 100 mm, o betão danificado será removido. Em seguida serão efectuadas ranhuras de 5 mm de largura e 15 mm de profundidade em toda a altura do pilar para alojar as tiras de laminado de fibras de carbono. Na sapata, no alinhamento das ranhuras, serão efectuadas perfurações com 150 mm de comprimento para fixação dos laminados à sapata. As ranhuras serão preenchidas com epóxi,

sendo de seguida inseridas as tiras de laminado. Por fim, a zona da rótula plástica e as perfurações na sapata serão preenchidas com um grout não retráctil.

## 6 CONCLUSÕES

Neste trabalho descrevem-se os procedimentos de concepção e preparação dos ensaios experimentais a serem realizados no âmbito de um projecto de investigação que se está a realizar na Universidade do Minho, relativo à utilização de materiais compósitos de fibras de carbono no reforço de pilares de betão armado. Para um mesmo grau de desempenho estrutural, as técnicas de reforço propostas neste trabalho aparentam ser de mais fácil execução e de requererem menor quantidade de material de reforço que as utilizadas actualmente. Os resultados preliminares obtidos nos primeiros ensaios cíclicos são apresentados e os problemas associados a este tipo de ensaios são discutidos. A técnica de reforço a ser aplicada nos pilares que desenvolvem modo de rotura de flexão é descrita.

## 7 AGRADECIMENTOS

Os autores do presente trabalho agradecem a colaboração prestada pelas empresas: Biu Internacional (na pessoa do Eng<sup>o</sup> Erik Ulrix); Nordesfer (na pessoa do Eng<sup>o</sup> Mendes Marques), Ferseque (nas pessoas dos Eng<sup>os</sup> Hélio Igrejas e Hugo Mota), Casais (nas pessoas dos Eng<sup>os</sup> Emanuel Martins e António Carlos), Secil (na pessoa da Eng<sup>a</sup> Raquel Figueira), Solusel (na pessoa do Eng<sup>o</sup> Fernandes) e VSL.

## 8 BIBLIOGRAFIA

- [1] ACI, Committee 440 - *State of the art report on application of FRP composites*. American Concrete Institute, 1993.
- [2] Deskovic, N. - *Innovative design of FRP composite members combined with concrete*, PhD thesis, Dept. of Civil and Envir. Engrg., Massachusetts Inst. of Technology, Cambridge, Massachusetts, 1993.
- [3] Karbhari, V.M., Seible, F., Hegemier, G. and Zhao, L. - "Fibre Reinforced Composite Decks for Infrastructures Renewal-Results and Issues", *Proceedings of the 1997 International Composites Expo*, Nashville, TN, 1997, p. 3C/1-3C/6.
- [4] Ali, Y. A.-Z.; Ambalavanan, R. - "Flexural behaviour of repaired RC beams using glass and carbon fibre repair systems under fatigue loading", *DRAMSTRUC*, Rio de Janeiro, 1998, T702.
- [5] Nanni, A. *et al.* - *Fiber Reinforced Plastic (FRP)-Reinforcement for Concrete Structures: properties and applications*. Elsevier Science Publishers B.V., Vol. 42, Amsterdam, 1993, 450 p.
- [6] Seible, F., and Karbhari, V. - "Advanced Composites for Civil Engineering Applications in the U.S." in *Proceedings of the First International Conference on Composites in Infrastructure, ICCI 96*, Tucson, Arizona, 1996, p. 21-37.
- [7] Scherer, J. - "Slot application of S&P laminates CFK", Publication of S&P reinforcement, 6 p.
- [8] Xiao, Y.; Ma, R. - "Seismic Retrofit of RC Circular Columns using Prefabricated Composites Jacketing", in *Journal of Structural Engineering*, **123**(10), 1997, p. 1357-1364.
- [9] Freitas, F.; Barros, J.A.O; Fonseca, P., "Manual do sistema de ensaio de estruturas – SENTUR", Dep. de Eng<sup>a</sup> Civil, Escola de Eng<sup>a</sup> da Universidade do Minho, 40 pp., Setembro de 1998.
- [10] Cruz, J.M.S.; "Comportamento cíclico de estruturas porticadas de betão armado reforçadas com fibras de aço", Tese de Mestrado, FEUP, 1998.
- [11] Publicação técnico/comercial da S&P Clever Reinforcement Company, 30 p.