

# REFORÇO DE PAVIMENTOS DE EDIFÍCIOS INDUSTRIAIS COM LAMINADOS DE FIBRAS DE CARBONO



**J. BARROS**  
Prof. Auxiliar  
Univ. do Minho  
Guimarães



**A. ANTUNES**  
Eng.º Civil  
CIVITEST Lda.  
Braga

## SUMÁRIO

A eficácia da técnica de reforço constituída pela fixação de laminados de CFRP, com adesivo epoxy, no betão de recobrimento de elementos de betão armado tem sido comprovada nos últimos anos no reforço à flexão de vigas e pilares, e no reforço ao corte de vigas. No presente trabalho, esta técnica é aplicada no reforço à flexão de painéis de um pavimento de um edifício industrial. Os procedimentos e o cálculo do reforço são descritos no presente trabalho.

## 1. INTRODUÇÃO

De forma a localizar a fendilhação inerente à retração do betão, é corrente executarem-se entalhes nas lajes dos pavimentos de edifícios industriais, os quais são correntemente designados por juntas de controlo de fendilhação ou juntas serradas [1]. O pavimento é assim decomposto num conjunto de painéis adjacentes. De forma a simplificar o dimensionamento do mesmo, o projectista centra-se fundamentalmente na análise de um painel tipo, tendo em conta que as acções mais desfavoráveis são as que advêm da aplicação de cargas aplicadas nos cantos e nos bordos do painel em causa [1]. Para otimizar a solução, é usual admitir-se que entre painéis adjacentes existe alguma capacidade de transferência de carga, a qual resulta fundamentalmente do imbricamento existente entre as faces da junta que delimita os painéis. No entanto, devido a fenómenos como a retração, a variação de temperatura e a fadiga do material, essa mais valia, tida em conta aquando do dimensionamento da laje, pode vir a ser marginal ou mesmo nula. Quando tal acontece, ocorrem fendas nos bordos e nos cantos dos painéis do pavimento, dado que o momento resistente dessas zonas passou a ser inferior ao

momento solicitante. Este tipo de fendas, corrente neste tipo de aplicações, deve-se também a deficiente dimensionamento que, por vezes, é consequência do não conhecimento das propriedades do solo de suporte à data do projecto. Como as fendas se localizam, predominantemente, na face superior do pavimento (deficiência em termos de resistência aos momentos negativos), a técnica de reforço com materiais compósitos que tem sido desenvolvida nos últimos anos no Dep. de Eng<sup>a</sup> Civil da Universidade do Minho (DEC-UM) é especialmente adequada para reabilitar este tipo de estruturas [2]. Sendo esta técnica constituída pela instalação de faixas de laminados de fibras de carbono (CFRP) em finos entalhes realizados no betão de recobrimento das peças a reforçar, a sua aplicação para aumentar a resistência aos momentos negativos de uma faixa de contorno dos painéis danificados, pode ser executada de forma simples e rápida e com recurso a equipamento correntemente utilizado na tecnologia de construção de pavimentos de edifícios industriais (PEI).

Os danos ocorridos nos painéis do PEI reforçado no presente trabalho deveram-se, fundamentalmente, ao facto dos bordos desses painéis terem sido dimensionados como bordos não solicitados por cargas móveis de elevado valor. Como esses painéis, nesses bordos, terminavam junto a uma parede divisória, a sua separação foi materializada por meio de uma junta de dessolidarização [1]. No entanto, após a construção do pavimento essa parede foi demolida e veículos, tal como o mostrado na Figura 1, passaram a circular sobre essa junta, que não dispunha de ferrolhos para transmissão de carga entre painéis adjacentes. Em consequência, ocorreram fendas no contorno dos painéis junto à parede demolida, ver Figura 2. O valor médio da máxima abertura de fenda era da ordem de 1 mm.



Figura 1 – Sobrecarga no pavimento



Figura 2 – Fendilhação observada

## 2. TÉCNICA DE REFORÇO

Na Figura 3 representa-se a disposição das faixas de laminado de CFRP adoptada no reforço do contorno dos painéis que apresentavam fendas de abertura superior ao limite admissível neste tipo de aplicações. Estes laminados têm secção transversal  $10 \times 1.4 \text{ mm}^2$  e foram inseridos em entalhes com aproximadamente 20 mm de profundidade por 4 mm de largura. Estes entalhes podem ser efectuados com o equipamento utilizado na realização das juntas serradas dos PEI. Ao longo dos bordos do painel os laminados de CFRP ficaram dispostos na ortogonal ao bordo, enquanto que nos cantos do painel, para aumentar a eficácia da técnica de reforço, os laminados ficaram inseridos em entalhes orientados a 45 graus (ver Figura 3a). Os entalhes ortogonais ao bordo, que ficaram atravessados pelos entalhes do canto do painel, foram efectuados com profundidade ligeiramente acrescida (cerca de 25 mm) por forma a poder sobrepor os laminados nesta zona. Dado que para a mesma sobrecarga, os momentos negativos no canto são superiores aos momentos negativos no bordo do painel, os laminados inseridos nos entalhes a 45 graus ficaram sobre os laminados inseridos nos entalhes ortogonais ao bordo do painel. Todos os laminados foram fixos ao betão por intermédio de adesivo epoxy. Para evitar a ocorrência de uma superfície contínua de menor resistência à flexão, logo a seguir à zona reforçada, o sistema de reforço foi constituído por laminados de 500 mm e 1000 mm de comprimento, dispostos de forma alternada (ver Fig. 3b).

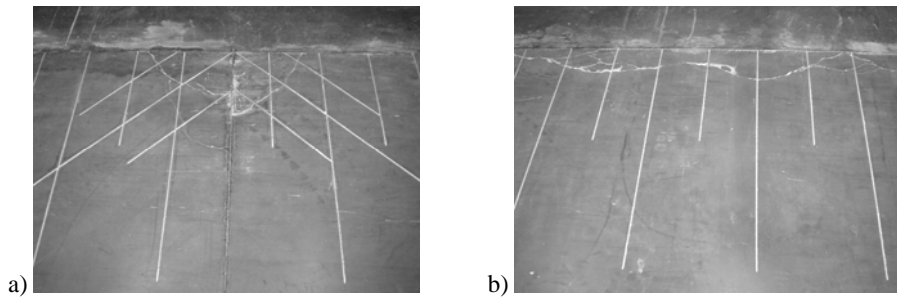


Figura 3: Disposição dos entalhes no canto a) e no bordo do painel b)

Antes do preenchimento dos entalhes com o adesivo epoxy, estes foram limpos com jactos de ar. Antes da aplicação do adesivo deve-se garantir que os entalhes estão isentos de qualquer tipo de humidade, por forma a ser assegurada a melhor aderência possível entre o adesivo e o betão. De seguida, os entalhes foram preenchidos com o adesivo, por intermédio de uma espátula (Fig. 4a). A confecção do adesivo foi efectuada segundo as recomendações do fabricante. Para retirar eventuais impurezas existentes nos laminados de CFRP, estes foram limpos com acetona. Antes da sua introdução nos entalhes, uma fina camada de adesivo foi aplicada em cada uma das faces do laminado (Figura 4b). Finalmente, os laminados foram introduzidos nos entalhes, tendo o adesivo em excesso sido recolhido com a espátula (Figura 4c).

Os laminados de CFRP utilizados têm a designação comercial CFK 150/2000  $10 \times 1.4$  e, segundo o fabricante, desenvolvem resistência à tracção e módulo de elasticidade de 2200 MPa e 150 GPa, respectivamente, pelo que a extensão última é de 1.47 %. Quando ao adesivo, tem resistência à tracção entre 16 a 22 MPa e módulo de elasticidade de 5 GPa [3].

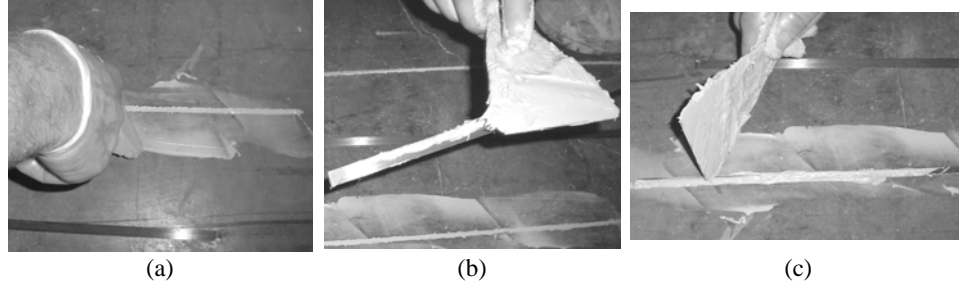


Figura 4: Fases do reforço: a) enchimento do entalhe com o adesivo; b) aplicação de adesivo em ambas as faces do laminado; c) inserção do laminado no entalhe

### 3. ESTRATÉGIA DE DIMENSIONAMENTO

Nesta secção descrevem-se os procedimentos de cálculo seguidos na avaliação da capacidade resistente da secção do pavimento, antes e após a aplicação do reforço.

#### 3.1 Modelo de secção

Nesta secção descreve-se, resumidamente, o modelo de secção utilizado na determinação da relação momento-curvatura ( $M - \chi$ ) da secção do pavimento, antes e após a realização do seu reforço. Mais detalhes podem ser encontrados em [4]. Na Figura 5 representa-se uma secção genérica discretizada em camadas, reforçada com laminados de FRP. A profundidade do eixo neutro ( $z_{EN}$ ) determina-se por intermédio da verificação da seguinte equação de equilíbrio:

$$\sum_{i=1}^{nLc} F_{c,i} + \sum_{k=1}^{nLf} F_{f,k} \leq tolef \quad (1)$$

em que  $nLc$  e  $nLf$  são, respectivamente, o número de camadas de betão e de FRP, e  $tolef$  é uma dada tolerância. Em (1)  $F_{c,i}$  e  $F_{f,k}$  são as forças na camada de betão  $i$  e no FRP  $k$ , respectivamente, determinadas pelas seguintes expressões:

$$F_{c,i} = b_i h_i \sigma_{c,i} \quad ; \quad F_{f,k} = A_{f,k} \sigma_{f,k} \quad (2)$$

em que  $b_i$ ,  $h_i$  e  $\sigma_{c,i}$  são, respectivamente, a largura, a espessura e a tensão da camada de betão  $i$ . Em (2)  $A_{f,k}$  e  $\sigma_{f,k}$  correspondem, respectivamente, à área e à tensão na camada  $k$  de FRP. A curvatura ( $\chi$ ) é determinada por intermédio do diagrama linear de extensões:

$$\chi = \varepsilon_{c,1} / (z_{EN} - h_1/2) \quad (3)$$

em que  $\varepsilon_{c,1}$  corresponde à extensão do folheto médio da primeira camada e  $h_1$  representa a espessura dessa mesma camada. Para o processo de cálculo da abertura e da progressão da fenda admite-se que a superfície de fractura permanece plana e que o ângulo de abertura da fenda é igual à rotação das secções da extremidade da banda de não linearidade (BNL). Esta

banda é onde se concentram os fenómenos de não linearidade por fendilhação e por deformação plástica do betão, tendo a investigação recente revelado que, para provetes de betão simples ou reforçados com fibras, o comprimento da BNL,  $s$  (ver Figura 6), é metade da altura da secção [5, 6]. Assim, em cada iteração é calculado um novo diagrama linear de abertura de fenda  $e$ , para cada uma das camadas que discretizam a parte fendilhada da secção obtém-se a abertura de fenda, sendo a correspondente tensão calculada por intermédio da lei  $\sigma - w$  adoptada (ver Figura 7). Para uma dada curvatura a abertura de fenda é determinada segundo as expressões seguintes:

$$\varepsilon = \frac{u}{s} \quad ; \quad \chi = \varepsilon / z_{EN} \quad ; \quad \varphi = (s/2)\chi \quad ; \quad w_c = (2\varphi)a = s\chi a \quad (4)$$

em que  $u$  é o deslocamento na superfície superior da secção,  $\varepsilon$  é a extensão nessa mesma superfície,  $\chi$  é a curvatura para uma determinada posição do eixo neutro,  $a$  representa a profundidade de progressão da fenda,  $\varphi$  é a rotação de uma das faces da BNL e  $w_c$  representa a máxima abertura de fenda. A formulação deste modelo foi implementada num programa de cálculo automático designado “DOCROS (“Design Of CROss Section”) [7].

### 3.2 Dimensionamento do sistema de reforço

Em painéis de PEI com bordo livre, como é o caso dos painéis em estudo, os momentos máximos desenvolvem-se quando a carga actua no canto do painel. Tendo-se estimado que o empilhador transmite uma carga de cálculo ( $F_{sd}$ ), por roda, de cerca de 30 kN e tendo-se assumido que a área de contacto da roda deste veículo (em borracha maciça) com o pavimento era de  $0.15 \times 0.04 \text{ m}^2$ , obteve-se para momento solicitante de cálculo o seguinte valor [1],

$$m_{sd} = F_{sd} / (2(1 + 4r_{eq} / L_c)) \quad (1)$$

em que

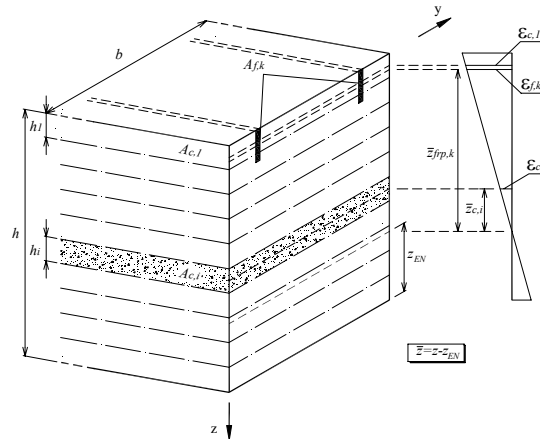


Figura 5: Discretização da secção em camadas e distribuição linear de extensões na secção

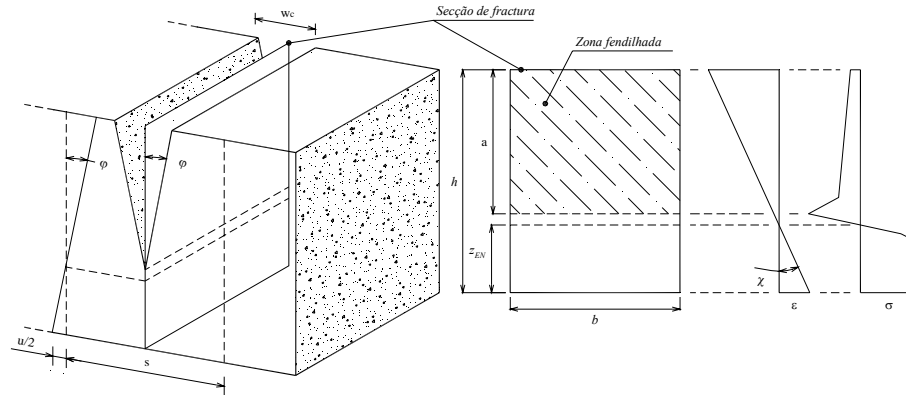


Figura 6: Idealização da progressão da fenda

$$L_e = \sqrt[3]{D_f/K_s}, \quad D_f = E_c h^3 / (12(1 - \nu_c^2)), \quad r_{eq} = \sqrt{l_1 l_2 / \pi} \quad (2)$$

é o comprimento de rigidez efectiva, a rigidez à flexão da laje e o raio equivalente da área de contacto da roda, respectivamente, sendo  $K_s$  o módulo de reacção do solo, estimado em  $10\,000 \text{ kN/m}^3$ ,  $E_c$  e  $\nu_c$  são o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson do betão,  $h$  é a espessura da laje e  $l_1, l_2$  são os comprimentos dos lados da área de carga (0.15 m e 0.04 m).

O pavimento é constituído por uma laje de 0.16 m de espessura em betão da classe de resistência C25/30 ( $E_c=30 \text{ GPa}$  e  $\nu_c=0.15$ ) reforçado com  $25 \text{ kg/m}^3$  de fibras de aço Dramix RL-45/50BN. Para estas condições o momento solicitante de cálculo é  $12.7 \text{ kN.m/m}$ . Tendo por base investigação experimental desenvolvida em trabalhos anteriores [6, 8], o comportamento pós-pico do betão reforçado com estas fibras de aço (BRFA) foi simulado pelo diagrama trilinear representado na Figura 7. Utilizando o *DOCROS* e valores característicos para as propriedades do betão obteve-se a relação  $M-\chi-w$  da secção do pavimento representada na Figura 8. Nesta figura também está representada a relação entre a abertura de fenda na superfície superior da laje e o momento resistente característico. Assim, o momento máximo resistente característico é  $18 \text{ kN.m/m}$ . Adoptando um coeficiente de 1.5 para reduzir valores característicos a valores de cálculo, o momento resistente máximo é  $12 \text{ kN.m/m}$ , pelo que o momento resistente de cálculo do painel, para as novas condições de fronteira deste, é inferior ao momento solicitante de cálculo, justificando os danos ocorridos.

Da análise do padrão de fendilhação existente no pavimento, adoptou-se o valor de 1 mm como sendo representativo da abertura das fendas no momento do reforço. Para esta abertura de fissura o momento característico e de cálculo da secção do pavimento é  $9.4$  e  $6.3 \text{ kN.m/m}$ , respectivamente, pelo que o sistema de reforço a aplicar deverá incrementar o momento resistente em cerca de  $6.4 \text{ kN.m/m}$  ( $12.7-6.3 \text{ kN.m/m}$ ) de forma a restabelecer o momento resistente necessário. Seguindo as recomendações do ACI [9] foi efectuado um predimensionamento do sistema de reforço tendo-se obtido 5 laminados por metro. Nas Figuras 9 e 10 apresenta-se a resposta  $M-\chi-w$  para dois cenários estudados de aplicação deste sistema de reforço. No primeiro cenário considera-se que as fendas existentes foram seladas com epoxi antes da aplicação do reforço, pelo que se admitiu que a integridade da secção de betão foi restabelecida. No segundo cenário (Figura 10) considerou-se que as fendas existentes

não foram seladas com epoxi. Assim, neste último cenário, após ter sido atingida a abertura de fissura de 1 mm na face superior da laje, foi simulado o comportamento da laje reforçada com 5 laminados por metro. No início desta segunda fase, o modelo considera para rigidez da laje a existente no momento em que foi aplicado o reforço. A extensão máxima admitida no CFRP foi 7.1%, dado que à extensão máxima indicada pelo fabricante foi aplicado o coeficiente ambiental  $C_E = 0.85$  proposto pelo ACI, bem como o coeficiente  $\kappa_m = 0.57$  que tem em conta a rigidez do CFRP e que permite determinar o conceito de extensão efectiva no CFRP [9].

Da análise dos gráficos das Figuras 9 e 10 verifica-se que o momento resistente de cálculo é somente superado se as fissuras existentes no pavimento for seladas antes da aplicação do reforço. Neste caso, o momento resistente de cálculo para abertura máxima admissível de fenda de 0.3 mm é de  $19.4/1.5 = 13$  kN.m/m, pelo que foi o sistema de reforço recomendado.

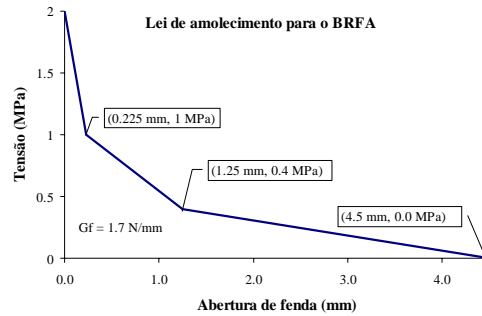


Figura 7 – Diagrama de amolecimento do BRFA.

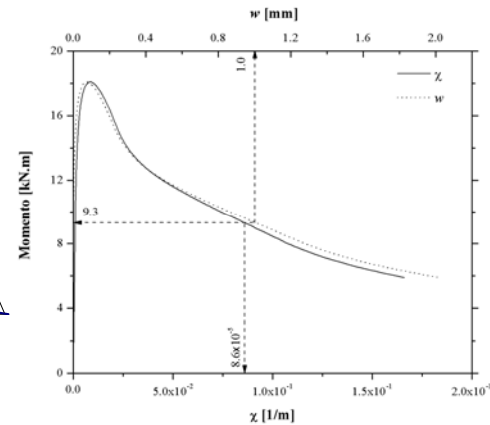


Figura 8 – Diagramas  $M - \chi - w$  de secção não reforçada.

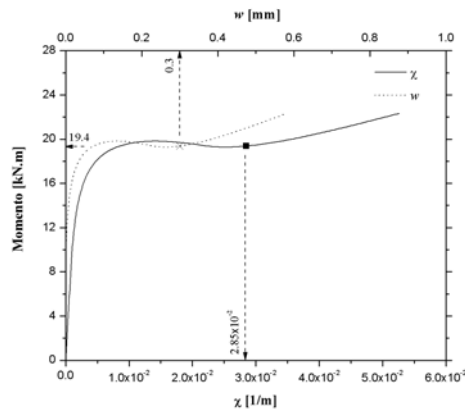


Figura 9 – Diagramas  $M - \chi - w$  de secção reforçada e com fendas seladas com epoxi.

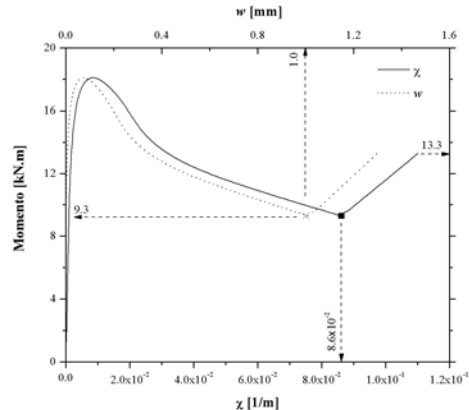


Figura 10 – Diagramas  $M - \chi - w$  de secção reforçada e com fendas não seladas.

#### 4. CONCLUSÕES

No presente trabalho a técnica de reforço constituída pela fixação de faixas de laminado de fibras de carbono no interior de entalhes executados no betão de recobrimento foi utilizada para aumentar a resistência à flexão de pavimento fendilhado de edifício industrial. Esta técnica é de fácil e rápida execução, sendo bastante eficaz no aumento da resistência aos momentos negativos deste tipo de estrutura. Os procedimentos de reforço são descritos neste trabalho, bem como a formulação do modelo numérico adoptado na avaliação da relação entre o momento e a curvatura e entre o momento e a abertura máxima de fenda, quer para a secção não reforçada como após reforçada.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração prestada pela empresa Pisonort – pavimentos industriais, Lda.

#### 6. REFERÊNCIAS

- [1] Barros, Joaquim – “Pavimentos Industriais: materiais, dimensionamento e processos construtivos”. *Relatório 00-DEC/E-5*, Universidade do Minho. 118p., Junho de 2000.
- [2] Barros, J.A.O.; Sena-Cruz, J.M.; Dias, S.J.E.; Ferreira, D.R.S.M; Fortes, A.S., "Investigação no âmbito da utilização de materiais compósitos no reforço de estruturas de betão", V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, 7-10 Junho 2003.
- [3] Sena-Cruz, J.M.; Barros, J.A.O., “Caracterização experimental da ligação de laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento”, Relatório técnico 02-DEC/E-15, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, 54 pp, Setembro 2002.
- [4] Ribeiro, A.F.; Cunha, V.M.C.F.; Barros, J.A.O.; Antunes, J.A.B., "Modelo de secção para dimensionamento à flexão de peças de betão armado", Seminário sobre Dimensionamento de estruturas de betão reforçado com fibras, Eds. Joaquim Barros, Pierre Rossi e Bruno Massicotte, pp. 3.1-3.17, 28 Novembro 2003.
- [5] Members of RILEM TC 162-TDF, “Design of steel fibre reinforced concrete using  $\sigma$ -w method: principles and applications”, *Materials and Structures Journal*, Vol.35, pp. 262-278, June 2002.
- [6] Barros, J.A.O., Cunha, V.M.C.F., Ribeiro, A.F., Antunes, J.A.B.; “Post-Cracking Behaviour of Steel Fibre Reinforced Concrete" aceite para publicação no *RILEM Materials and Structures Journal*, 2004.
- [7] Ribeiro, A.F., Cunha, V.M.C.F., Barros, J.A.O., Antunes, J.A.B., "Modelo de secção para dimensionamento à flexão de estruturas de betão: formulação e manual do programa *DOCROS*", Relatório 03-DEC/E-25, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, 59 pp, Novembro 2003.
- [8] Barros, J.A.O., “Comportamento do betão reforçado com fibras - análise experimental e simulação numérica”, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pp. 502, Dezembro 1995.
- [9] Barros, J.A.O., "Dimensionamento de reforço à flexão e ao corte com FRP segundo as recomendações do ACI 440", Relatório 04-DEC/E-12, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, 34 pp., Abril de 2004.