

UTILIZAÇÃO DE FOLHA FLEXÍVEL DE FIBRAS DE CARBONO PRÉ – IMPREGNADA NO AUMENTO DA RESISTÊNCIA E DUCTILIDADE DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE BETÃO ARMADO

Ripper, T. *; Costa, J. P. **

* Dep.^{to} Eng. Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa

** s. t. a. p - Reabilitação, Modificação e Protecção de Estruturas, S. A.

SUMÁRIO

Este texto pretende, por um lado, caracterizar, resumidamente, as vantagens da utilização de folhas flexíveis de fibras de carbono pré – impregnadas como elemento básico em processos de reforço de estruturas de betão armado, particularmente no respeitante ao aumento da ductilidade dos elementos estruturais, mas também no aumento da capacidade resistente, como alternativa aos sistemas de reforço tradicionais, nomeadamente a adição de chapas de aço coladas.

Por outro lado propõe-se chamar a atenção para os cuidados que devem ser tomados quer nos procedimentos de aplicação quer no cálculo e pormenorização deste tipo de reforço.

ABSTRACT

This paper aims, on one hand, to summarise the advantages of using carbon fiber prepreg sheets as a product for the strengthening of existing reinforced concrete structures, mainly for the improve of its ductility behaviour, but also on the improve of both flexural and shear strength, as an alternative to other strengthening systems, particularly bonding of steel plates.

On the other hand, it will discuss some particular aspects about the cautions to be taken on the application and design of this system.

1. HISTORIAL

Perante a constante ameaça de um violento sismo no distrito de Kanto, que inclui a cidade de Tóquio, o governo japonês tomou a decisão, em meados da década passada, de para tanto preparar as construções existentes, em particular as estruturas do sistema viário.

Assim, a partir da conjugação de esforços entre entidades públicas e privadas daquele país no sentido de investigarem novas tecnologias para o reforço das estruturas, surgiu a ideia de se adaptar a utilização de compósitos de fibras de carbono (CFRP), um material já largamente utilizado em soluções de reforço de alto desempenho, nomeadamente nas indústrias aeronáutica, aeroespacial, naval e automobilística, ao reforço das estruturas de betão armado, tirando o melhor partido de um produto muito resistente, de simples aplicação

e que não traz às estruturas de betão os problemas de durabilidade como os que hoje são associados à corrosão das armaduras.

A tecnologia para reforço de estruturas de betão com compósitos de fibras de carbono conheceu alguns ajustes importantes e ganhou particular desenvolvimento após a ocorrência do sismo de Kobe, em 1995.

Trata-se, portanto, de mais um passo evolutivo da própria indústria da Construção Civil, na sua constante busca por novas tecnologias, mais simples, resistentes e duráveis para a reabilitação de estruturas de betão, dando sequência a um ciclo que antes já passou pelo recurso a metodologias tão diferentes quanto as do aumento das secções pela aplicação de betão projectado e/ou de argamassas modificadas ou, por outro lado, pelo reforço através da adição de chapas de aço coladas ao betão.

A utilização de compósitos reforçados com fibras (FRP) em elementos de betão, como alternativa ao aço, começou, ao que se tem notícia, a meio deste século (Rubinsky and Rubinsky, 1954). A pura e simples substituição dos varões de aço por elementos de FRP como armadura para o betão tem sido restrita a situações muito específicas, sendo mesmo uma técnica quase exclusiva das estruturas para ambientes em que ocorram fenómenos como a ressonância magnética (como em certos hospitais, por exemplo), casos em que o emprego do aço não é admissível.

Na grande maioria dos casos, o CFRP vem sendo utilizado para melhorar o desempenho dos pilares de pontes e viadutos, dado que as experimentações disponíveis apontam para um notável aumento da ductilidade destes elementos de betão armado quando reforçados, em sistema confinante, pelas folhas flexíveis de fibras de carbono, que são perfeitamente capazes de se moldar à sua superfície lateral. Esta metodologia, para pilares, já está devidamente regulamentada no Japão.

As folhas flexíveis de fibras de carbono podem ser também utilizadas para o aumento da capacidade resistente, à flexão e ao esforço transversal, de vigas e lajes, processo que, no entanto, exige muito cuidado no desenvolvimento dos pormenores a adoptar para o sistema de amarração do compósito, assim como a mais detalhada análise das tensões de deslizamento na interface entre o compósito e o betão.

Em Portugal o reforço de estruturas de betão com compósitos de fibras de carbono começa a ser utilizado, ainda que de maneira cautelosa, não só em estruturas de betão mas também em construções de alvenaria resistente, sendo objecto, em paralelo, de pesquisa pelas principais Universidades do País.

2. BREVE CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO

As fibras de carbono resultam do processo de carbonização de fibras de polímeros orgânicos, sendo suas características mecânicas directamente dependentes da estrutura molecular obtida.

A produção de fibras de carbono requer processamentos a temperaturas elevadíssimas (da ordem dos 3000 °C), face às quais a grande maioria das fibras sintéticas se derrete ou se evapora. Isto não acontece, no entanto, com certas fibras, como o acrílico, por exemplo, que

mantém a sua estrutura molecular mesmo após a carbonização, ficando os átomos de carbono alinhados ao longo das fibras originais. O agrupamento de um conjunto da ordem da dezena de milhar destes filamentos, que adquire a espessura de um cabelo, apresenta excepcionais características mecânicas, que, a depender do arranjo micro – estrutural das fibras, podem ser traduzidas tanto num elevado módulo de elasticidade quanto numa extraordinária resistência à tracção.

Para a utilização como elemento de reforço estrutural, é costume trabalhar-se mais frequentemente com compósitos de fibras de carbono de elevada resistência à tracção e com módulo de elasticidade semelhante ao do aço de construção.

Existem diversas formas comerciais para reproduzir as fibras de carbono, normalmente passando pela sua incorporação a uma matriz de resinas poliméricas, com a eventual adição de metais, por forma a se conseguir a obtenção de formas tão diferentes como perfis, varões, laminados, tecidos bi – direccionais e folhas flexíveis uni – direccionais.

A forma comercial mais frequentemente empregue para aumento da ductilidade e/ou da resistência das estruturas de betão armado são as folhas flexíveis pré – impregnadas, sistema em que os feixes de filamentos de fibras de carbono são agrupados de forma contínua e aderidos a uma folha de suporte impregnada com pequeníssimas quantidades de resina de epóxido (ver figura 1), assumindo espessuras da ordem das décimas de milímetro. O elemento compósito é formado quando da adição da resina de colagem, criando uma matriz altamente resistente.

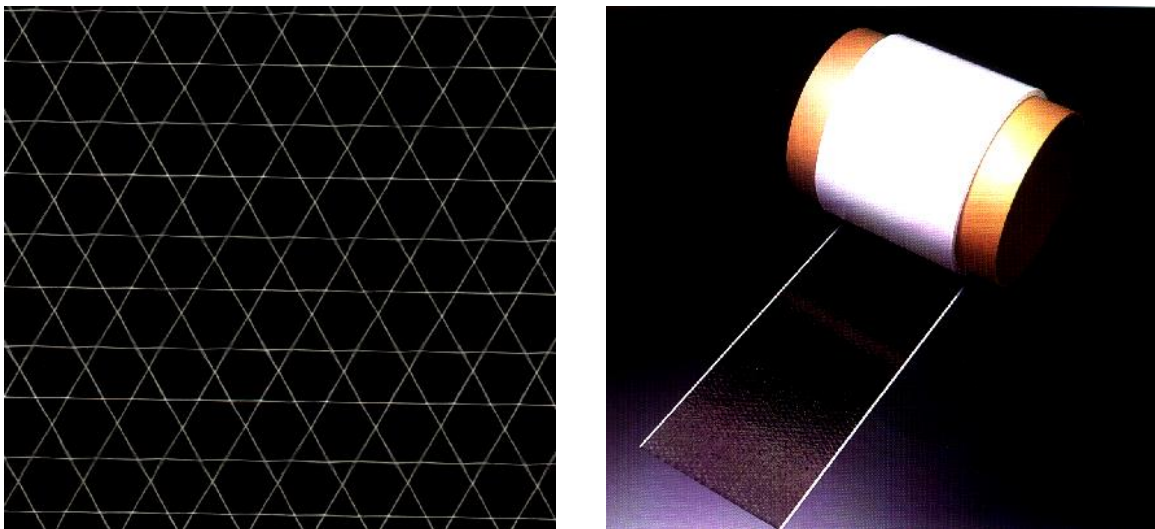


Figura 1 – Aspecto das folhas flexíveis pré – impregnadas de fibras de carbono, em pormenor (à esquerda) e em rolo contínuo (à direita)

A resina a utilizar deverá ter resistência e dureza adequadas para bem transferir o esforço de corte entre a folha e o betão, devendo ser, por outro lado, suficientemente elástica para prevenir a rotura frágil nesta interface.

A adesão à superfície existente, previamente impregnada com um primário (resina de epóxido muito fluida) é feita por aplicação directa da folha flexível de fibras de carbono, sendo a colagem garantida pela própria formação do elemento compósito, aquando da aplicação de uma fina camada de resina de epóxido, que permite a fácil moldagem do

conjunto às diversas formas geométricas da superfície receptora, sem que haja perda de linearidade (entrelaçamento) entre as fibras. É fundamental que a quantidade de resina seja a estritamente necessária à colagem, para que não haja alteração das características do compósito (quanto mais resina, maior o peso e menor a resistência).

Os compósitos de fibras de carbono em matrizes de resina de epóxico apresentam, comparativamente ao aço de construção, para uma mesma espessura, a quarta parte do peso e resistência à tracção oito a dez vezes superior, para o mesmo módulo de elasticidade. A curva comportamental destes compósitos até a rotura é linear, como se pode observar através da representação constante da figura 2, característica de um comportamento frágil na rotura, sendo as tensões últimas da ordem dos 3500 MPa, para correspondentes extensões de 1,5 %.

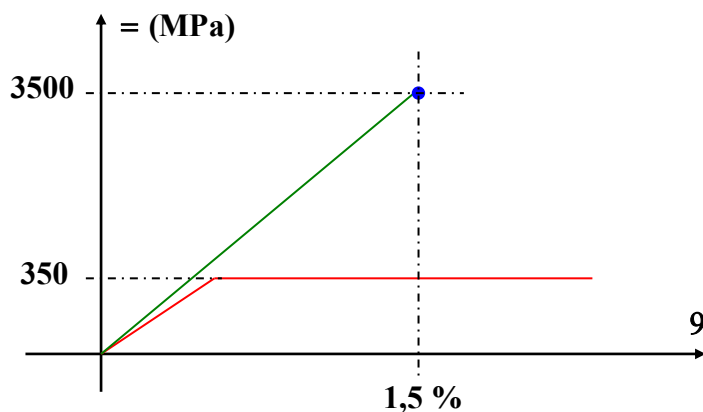


Figura 2 – Curvas $\sigma - \epsilon$ para os CFRP e para os aços de construção

3. O SISTEMA DE APLICAÇÃO

O desempenho futuro de uma construção reforçada com compósitos de fibras de carbono será directamente dependente da qualidade da aplicação do produto sobre a superfície dos elementos a reforçar.

Neste aspecto, poder-se-á dividir o processo em duas etapas distintas: a de preparação da superfície receptora e a de aplicação do compósito propriamente dito.

A superfície de betão precisará ser cuidadosamente afagada, através de esmerilagem. Não se deseja, neste caso, o efeito conseguido pela picagem, como se requer, por exemplo, na preparação de superfícies destinadas a receber betão projectado ou argamassa de reparação, mas simplesmente remover as sujidades e a fina camada de leitada de cimento que sempre reveste os elementos de betão cofrados, permitindo assim a absorção do primário a ser aplicado e a consequente melhoria das propriedades aderentes da camada de betão da interface.

Caso existam defeitos geométricos ou de execução ao longo da superfície a ser revestida, estes deverão ser reparados pela aplicação de argamassas de resina de epóxico acabadas à espátula. As arestas vivas deverão ser arredondadas, por forma a que apresentem um raio mínimo de curvatura da ordem dos 30 mm.

Preparada a superfície, poderá ser, de imediato, aplicado o primário, cuja função será

não só a de melhorar, através da impregnação, as características do betão da superfície, como também garantir a plena adesão do compósito.

Decorrido um intervalo de aproximadamente uma hora sobre a aplicação do primário, deverão ser aplicados, sequencialmente, a resina de colagem (undercoating), a folha flexível de fibras de carbono (previamente desenrolada e cortada, com uma vulgar tesoura, à rigorosa medida do reforço a ser executado) e a camada final de resina de recobrimento das fibras (overcoating). Em qualquer caso o excesso de resina deverá ser cuidadosamente removido.

A eventual aplicação de outras camadas é imediata, servindo a camada precedente como base para as seguintes. É no entanto possível diferir, no tempo, a aplicação das sucessivas camadas em até uma semana, desde que se aplique, sobre a resina endurecida, uma nova camada de resina fresca (undercoating).

O sistema de aplicação das folhas flexíveis de fibras de carbono está esquematicamente representado na figura 3, a seguir.

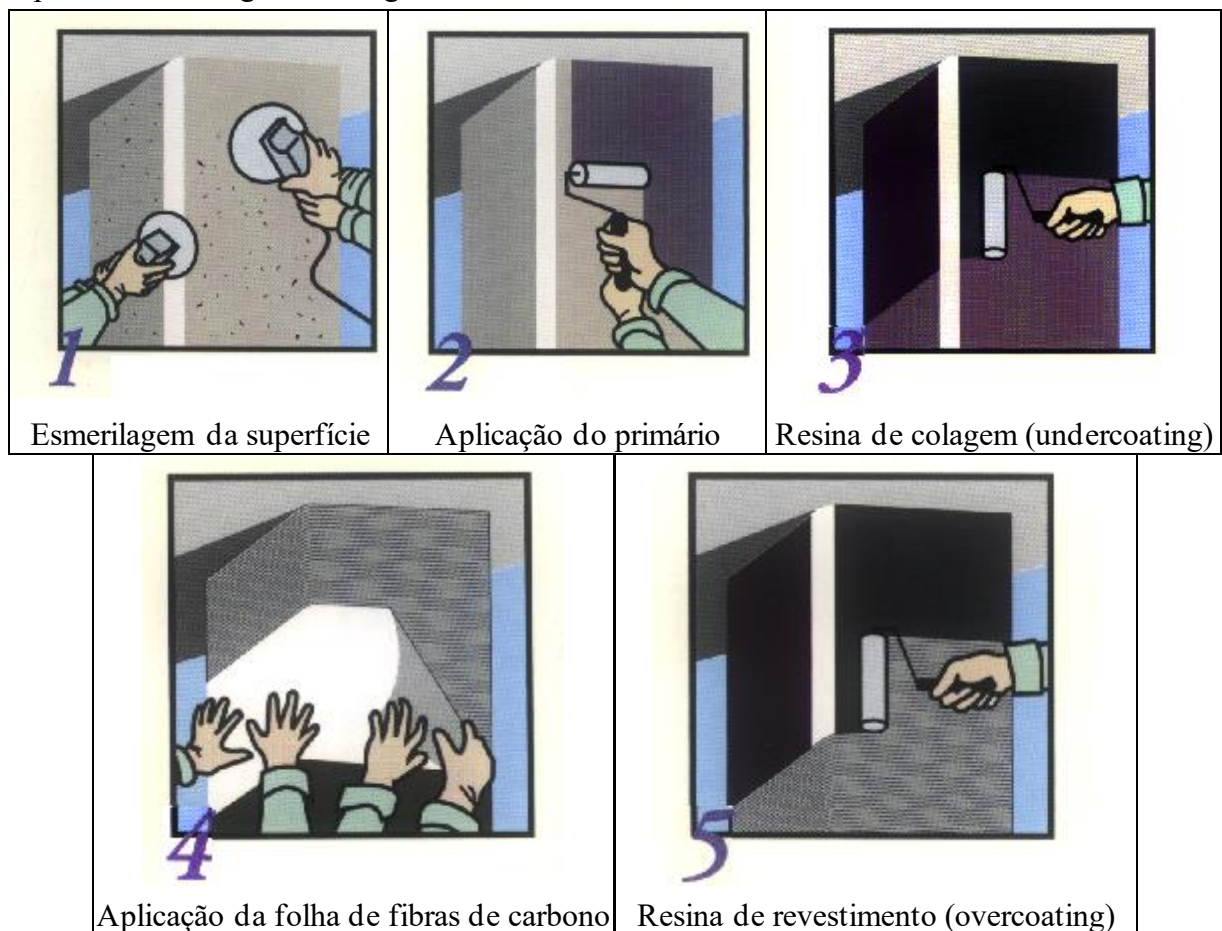


Figura 3 – O sistema de aplicação das folhas flexíveis de CFRP

Os ensaios até hoje disponíveis asseguram um bom funcionamento do sistema até um total de dez camadas, sendo recomendável, no entanto, que sempre que este número for superior a seis sejam realizados ensaios específicos de desempenho. Pretendendo garantir-se a distribuição transversal do reforço as diferentes camadas poderão ser dispostas ortogonalmente entre si.

O acabamento final das superfícies poderá ser feito com revestimentos de alto

desempenho que, em simultâneo, confirmam ao sistema um melhor comportamento na resistência a acção do fogo.

4.O REFORÇO DE PEÇAS DE BETÃO ARMADO COM COMPÓSITOS DE FIBRAS DE CARBONO PARA AUMENTO DA CAPACIDADE RESISTENTE

Anteriormente à ocorrência do sismo de Kobe e a consequente análise do comportamento das estruturas por ele afectadas, o sistema básico para a modificação e melhoria do comportamento das construções existentes pelo reforço com compósitos de fibras de carbono era orientado no sentido do aumento da capacidade resistente das peças, quer quanto a flexão (principalmente lajes e vigas), quer quanto ao esforço transversal (para pilares, em especial). Depois, como adiante se verá, a orientação geral passou a ser no sentido do aumento da ductilidade.

Os diversos ensaios disponíveis mostram que as deformações nas fibras do compósito, quando uma viga de betão armado reforçada é levada até a rotura, assumem um comportamento linear, mesmo quando o betão deixa a fase elástica e passa à plástica.

Assim sendo, será admissível considerar-se, para efeitos de dimensionamento, que o cálculo da área de CFRP necessária para o reforço de vigas de betão armado à flexão possa ser feito em serviço, à semelhança de outros sistemas, nomeadamente o de colagem de chapas metálicas.

Quanto aos valores das tensões e extensões admissíveis a adoptar para este cálculo, sempre na dependência de ligeiras correcções que serão função de cada produto – ou Fabricante – específico, os já milhares de projectos desenvolvidos apontam para números da ordem dos 800 MPa e 1,0 %, respectivamente, para acções de longa duração.

O principal cuidado a ser tomado, em termos do dimensionamento dos reforços com folhas flexíveis de fibras de carbono, estará no pormenor da amarração destas ao betão, justamente porque, neste aspecto, a eficiência do sistema dependerá não só do compósito – resina, em especial -, mas também, e principalmente, da capacidade da camada de betão interessada (entre os varões da armadura e a superfície) em adequadamente responder à mobilização das forças de corte para a efectivação da transferência de tensões e consequente accionamento da contribuição do reforço.

Apesar do bom resultado dos ensaios executados com sistemas de amarração simples, garantidos apenas pelo atendimento a um comprimento de entrega mínimo, a prática da execução, traduzida na grande maioria dos trabalhos de reforço já levados a cabo, trouxe uma clara opção por se garantir a eficiência da amarração através do recurso a dispositivos mecânicos que, no caso de reforço com folhas flexíveis pré - impregnadas, consiste em simplesmente envolver a totalidade da secção traccionada das peças, como se pode identificar pela observação da figura 4, a seguir.

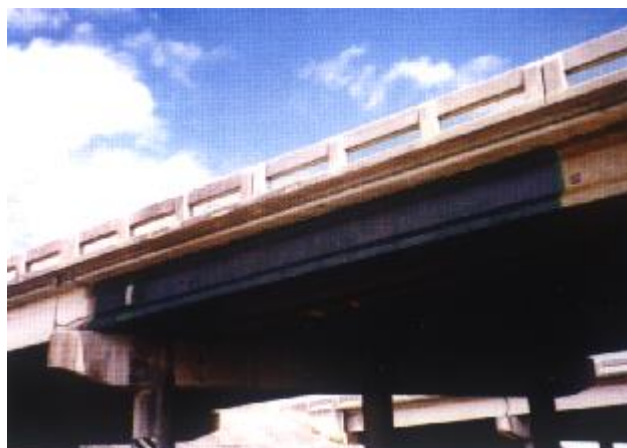
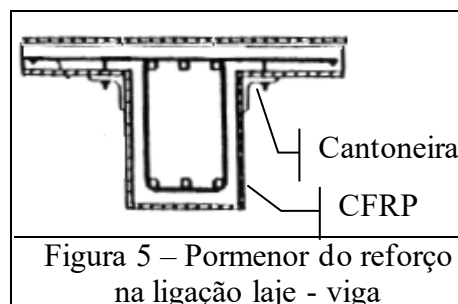


Figura 4 – Aumento da capacidade resistente de uma viga

Este sistema de amarração poderá permitir, em simultâneo, o aumento da capacidade resistente ao esforço transversal, desde que o envolvimento da peça seja total ou, no caso da existência de lajes, se garanta a eficiência da contribuição do banzo através da interposição de elementos metálicos – cantoneiras fixadas por buchas ao betão – na ligação laje – viga.

Relativamente a esta questão, importará referir que os ensaios realizados pela Mitsubishi Chemical Corporation mostram mesmo não haver qualquer diminuição sensível no desempenho de uma viga em T reforçada segundo o pormenor indicado na figura 5 (ao lado), se comparada com o de uma viga de secção rectangular de mesmas dimensões $b \times h$ completamente envolvida por folhas flexíveis de fibras de carbono.



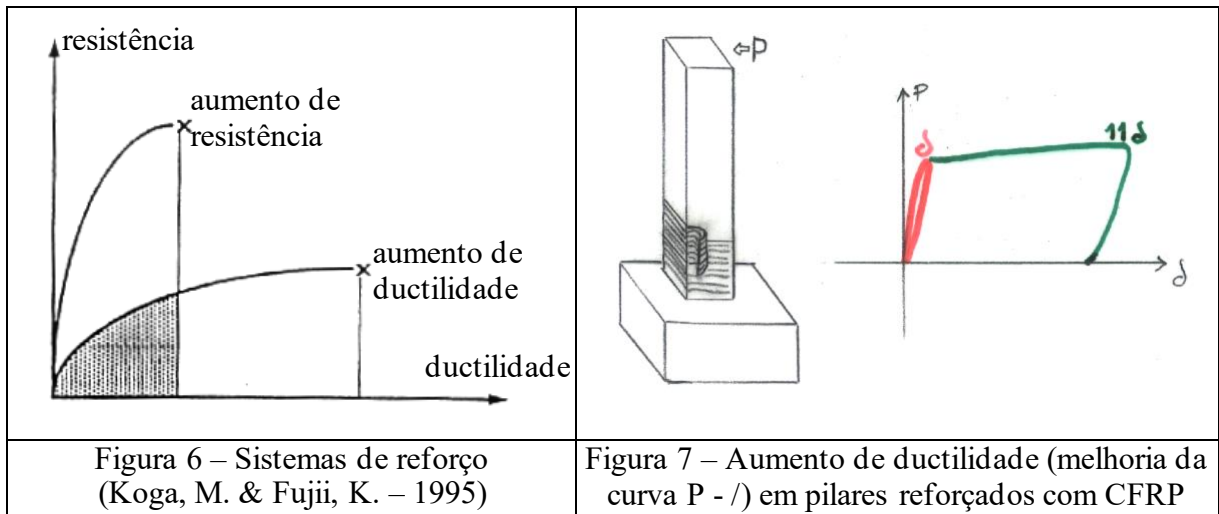
Ainda em termos de procedimentos de cálculo, mas agora para os casos de reforço para aumento de resistência ao esforço transversal, sugere-se que, para o dimensionamento à rotura, a capacidade resistente seja determinada a partir da soma das contribuições individuais do betão, dos varões da armadura e do elemento compósito, sendo esta última parcela afectada de um coeficiente de comportamento igual a 0,8, assumindo-se, para o dimensionamento, o mecanismo de treliça modificado.

5.O REFORÇO DE PEÇAS DE BETÃO ARMADO COM COMPÓSITOS DE FIBRAS DE CARBONO PARA AUMENTO DA DUCTILIDADE

A análise do comportamento das estruturas afectadas pelo sismo de Kobe, em 1995, trouxe grandes alterações nos sistemas de construção e na metodologia de consideração das acções sísmicas, particularmente para estruturas do sistema viário, posto que a aceleração sísmica característica passou a ser dez vezes superior às até então adoptadas.

Tal facto implicou, de imediato, uma alteração na abordagem à metodologia de modificação das estruturas existentes para fazer frente às acções sísmicas, que deixou de ser direccionada para o aumento da resistência e passou a privilegiar o aumento da ductilidade dos elementos estruturais, visando a que estes atingissem uma maior capacidade de absorção de energia. A diferença entre as duas propostas está sintetizada no gráfico constante da figura

6, de cuja observação se poderá inferir a vantagem da utilização de um método misto que, orientado para o aumento de ductilidade, comporte o aumento de resistência que garanta a configuração do mais adequado mecanismo de rotura.



O sistema de reforço com CFRP para aumento de ductilidade de uma estrutura tem por objectivo básico a melhoria da capacidade de deformação plástica dos seus elementos, que se traduz no melhor comportamento da curva P - δ .

Nos ensaios realizados, foram obtidos resultados como os que podem ser observados na figura 7, atrás, em que a capacidade de deformação de uma coluna foi aumentada em 11 vezes graças à acção confinante exercida por folhas flexíveis de fibras de carbono, que não só impede o colapso do betão da camada de recobrimento como também o bambeamento dos varões da armadura principal, aumentando, em paralelo, graças à excelente rigidez à flexão do compósito, a deformação última do betão à compressão e a própria resistência do pilar ao esforço transverso.

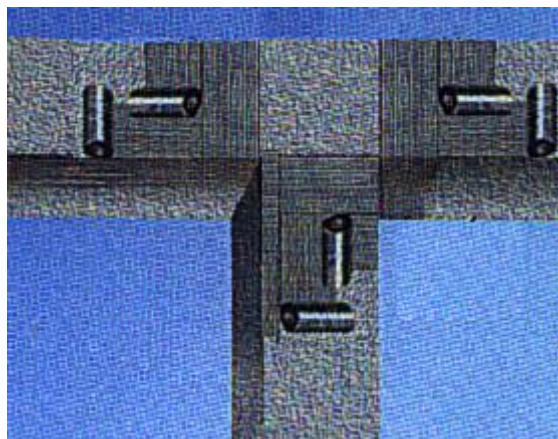


Figura 8 – Aumento de ductilidade por reforço dos elementos de um nó

A prática estabelecida pelas obras já executadas levou a utilização de sistemas de confinamento total ou parcial (apenas nas regiões mais próximas aos nós) de pilares e vigas, como o que se procurou representar na figura 8, atrás.

Será interessante ainda referir que a dificuldade – muito frequente, aliás, de se conseguir levar o reforço mesmo até o nó, despertou a atenção dos técnicos da Mitsubishi Chemical

Corporation e motivou que tal situação fosse simulada, em ensaios, cujos resultados demonstraram que mesmo que o reforço seja interrompido a uma distância de até 10 cm do nó (figura 9, a seguir), não haverá redução sensível de desempenho.

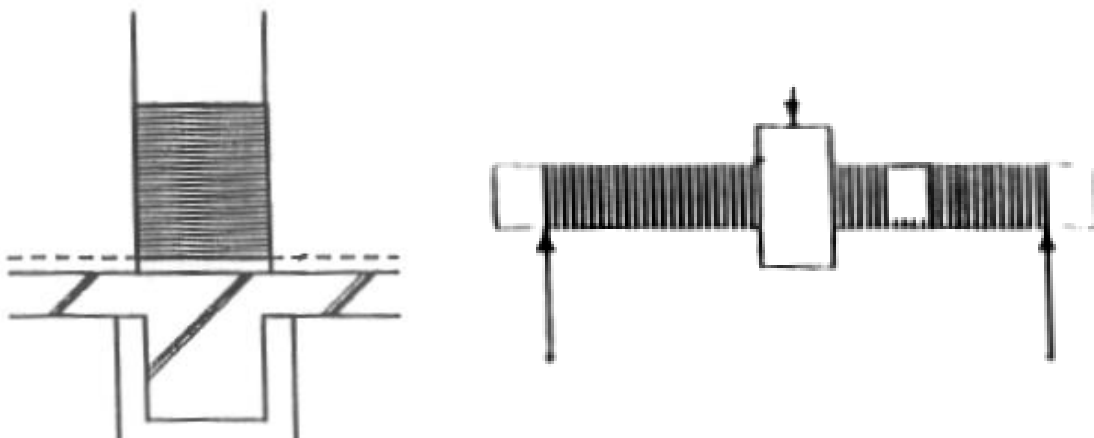


Figura 9 – Ensaio de um reforço com confinamento interrompido a 10 cm do nó

6.CONCLUSÕES

Os sistemas de reforço pela adição de folhas flexíveis de fibras de carbono pré – impregnadas, tanto para aumento da ductilidade como da capacidade resistente de elementos estruturais de betão armado, apesar de recentes, já provaram a sua eficácia.

Para a mais perfeita consecução dos objectivos pretendidos, haverá que adoptar, sempre, procedimentos de cálculo e execução acurados, possibilitando assim, aos profissionais capazes, tirar partido de um processo simples, mas extraordinariamente poderoso.

Recomenda-se vivamente a intensificação das pesquisas, que deverão não só alargar os conhecimentos técnicos disponíveis na matéria como direccionar o sistema para a realidade portuguesa.

Será porventura um interessante tema para reflexão a associação de ideias entre a situação há tão pouco tempo vivida no Japão, à espera de um sismo na região de Tóquio e que antes veio a ocorrer em Kobe, motivando tão determinadas atitudes, e a que presentemente se vive em algumas regiões de Portugal, onde se admite estar muito perto do limite superior do período de recorrência de um grande sismo.

7.AGRADECIMENTO

Os autores agradecem a Mitsubishi Chemical Corporation a disponibilização de farta documentação sobre os ensaios desenvolvidos, assim como pela indicação de obras realizadas e em realização e dos profissionais responsáveis pela elaboração dos respectivos projectos, sem o que a realização deste trabalho não seria possível.

8.REFERÊNCIAS

- Rubinsky, I. & Rubinsky, A. “An Investigation on the Use of Fiber Glass for Prestressed Concrete”. *Magazine of Concrete Research*. Janeiro, 1954.
- Koga, M & Fujii, K. “Application of CRS Method – Carbon Fiber Retrofitting System for Concrete Structure” - *7th Technical Research Symposium on Inspection and Repair for Structures*. Novembro, 1995.
- American Concrete Institute*. “ACI 440R – 96 – State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic Reinforcement for Concrete Structures”. Janeiro, 1996.
- Thomas, J. & Kline, T. “Strengthening Concrete with Carbon Fiber Reinforcement”. *Concrete Repair Digest*. Abril, 1996.
- Arduini, M. “Il Rinforzo di Strutture com Fogli di Materiale Composto”. Janeiro, 1997.
- Koga, M. & Ohtsu, M. “A Retrofitting System for Concrete Structures with CFRP – Sheet and CFRP – Strand – It’s Basic Mechanism and Applications – ’97 Structural Faults and Repair – Julho, 1997.
- Robery, P & Innes, C. – Carbon Fibre Strengthening of Concrete Structures - ’97 Structural Faults and Repair – Julho, 1997.
- Ando, T., Hoshijima T. & Yagi K. “Strengthening and Repair of Existing Structures with Carbon Fiber Sheet”. *5th Japan International SAMPE Symposium*. Outubro, 1997.
- Emmons, P., Thomas, J. & Vaysburd, A “Muscle Made with Carbon Fiber”. *Civil Engineering*. Janeiro, 1998.