



INOVAÇÃO E TECNOLOGIA FIBRAS DE AÇO NO REFORÇO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS APLICAÇÃO EM ADUELAS PRÉ-FABRICADAS

O GRUPO DE ESTRUTURAS DE BETÃO E MATERIAIS COMPÓSITOS DO CENTRO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE DO MINHO E A EMPRESA SPIE BATIGNOLLES TÊM VINDO A DESENVOLVER UM PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL COM O INTUITO DE AVALIAR A POSSIBILIDADE DE SUBSTITUIÇÃO TOTAL OU PARCIAL, POR FIBRAS DE AÇO, DA ARMADURA CONVENCIONAL NORMALMENTE UTILIZADA EM ADUELAS PRÉ-FABRICADAS PARA O REVESTIMENTO DE TÚNEIS. ESTE ARTIGO APRESENTA, DE FORMA SINTÉTICA, A INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL E NUMÉRICA EFECTUADA, BEM COMO ALGUMAS PARTICULARIDADES RELATIVAS AO USO DE FIBRAS METÁLICAS NOS REFERIDOS ELEMENTOS PRÉ-FABRICADOS.

TEXTO E FOTOS LÚCIO LOURENÇO, JOAQUIM BARROS, VÍTOR DINIS, SIMÃO SANTOS



36-43

As aduelas pré-fabricadas, constituídas por betão de elevada resistência, têm vindo a ser aplicadas no revestimento de túneis. A opção por este tipo de elementos estruturais deve-se ao facto de, entre outras vantagens, proporcionarem elevada rentabilidade de aplicação e, ao mesmo tempo, constituírem segmentos de espessura relativamente reduzida. Dada a significativa percentagem de armadura convencional utilizada no reforço destes elementos (figura 1), os encargos associados ao material e à mão-de-obra dispendida na sua montagem representam um peso significativo no custo de fabrico da aduela. Se esta armadura de reforço, ou uma percentagem significativa, puder ser substituída por fibras discretas de aço (figura 2), o processo de pré-fabricação é simplificado, podendo obter-se soluções estruturais mais económicas, caso os custos derivados da utilização das fibras sejam inferiores aos afectos à aplicação da armadura convencional. Além disto, dada a distribuição tridimensional das fibras no seio do betão, a sua eficácia em termos de contribuição para a resistência, quer aos esforços de corte, quer às tensões de tracção advindas de acções não controláveis (principalmente, durante a fase de instalação) pode ser superior à garantida pela armadura convencional. Em aplicações prévias, no âmbito da utilização de fibras de aço no reforço de aduelas pré-fabricadas, remetiam-se para as fibras de aço apenas duas funcionalidades:

- a de melhorar o comportamento do betão perante eventuais impactos durante a manipulação e a colocação das aduelas, reduzindo-se o número de segmentos com lascas ou fissuras;
- a de oferecer resistência suplementar à desintegração do betão devida à corrosão da armadura convencional.

No entanto, a investigação que tem sido desenvolvida ao nível do Betão Reforçado com Fibras de Aço (BRFA), nomeadamente pelo Grupo de Estruturas de Betão e Materiais Compósitos do Centro de Engenharia Civil da Universidade do Minho (www.civil.uminho.pt/composites), tem demonstrado que a adição de fibras de aço ao betão aumenta, significativamente, as resistências ao corte e à flexão destas peças pré-fabricadas, desde que as fibras tenham as propriedades materiais e geométricas adequadas e que o betão seja concebido para tirar partido dos mecanismos de reforço que as fibras podem proporcionar. As experiências ocorridas noutros países demonstram, aliás, ser possível a utilização de fibras de aço como único elemento de reforço em aduelas pré-fabricadas [1].

PROGRAMA EXPERIMENTAL

A produção de aduelas pré-fabricadas em BRFA necessita de uma atenção especial devido à elevada dosagem em fibras que é necessária para este tipo de aplicações. Comparativamente às aplicações mais convencionais de BRFA, como é o caso de pavimentos industriais, a dosagem em fibras é significativamente mais elevada (entre 50 a 90 kg/m³). As composições de BRFA devem ser concebidas tendo em conta a presença das fibras, especialmente para dosagens superiores a 30 kg/m³ de betão; caso contrário, a trabalhabilidade e a compacidade destes betões serão inferiores às do correspondente betão simples. Assim, é necessário que a definição da composição a adoptar atenda à quantidade e ao tipo de fibras a utilizar. Outro aspecto que deverá ser tido em conta é a grande influência que o processo produtivo tem na distribuição e orientação das fibras no betão, pelo que este deverá ser estabelecido de forma a garantir a distribuição mais homogénea possível das fibras. O método adoptado para obtenção de composições de BRFA é constituído por três fases: i) afinação da composição da pasta ligante; ii) determinação

da composição do esqueleto sólido, em que as percentagens relativas de cada um dos constituintes são definidas; iii) obtenção da percentagem de pasta por m³ de BRFA que resulta numa mistura com as características de trabalhabilidade requeridas e resistência aos fenómenos de segregação e exsudação. A influência das fibras de aço na composição é tida em conta na fase ii do método, dado que estas influenciam o arranjo do esqueleto sólido da composição. Assim, para cada tipo e dosagem de fibras é fundamental proceder à definição do esqueleto sólido correspondente. No âmbito do presente programa experimental foram definidas nove composições, variando-se a dosagem em fibras metálicas (de 60 a 90 kg/m³) e a classe de resistência do betão (f_{ck} entre 50 e 90 MPa).

Como é sabido, para simular numericamente o comportamento linear e elástico de um dado material é necessário conhecer os seus valores do módulo de elasticidade, E_c , e do coeficiente de Poisson, ν . No entanto, caso se pretenda simular o comportamento não linear material de estruturas de betão é necessário conhecer o valor dos parâmetros intrínsecos ao modelo constitutivo adoptado que, na maior parte dos casos, envolvem o conhecimento: do módulo de elasticidade inicial, E_c ; da resistência à compressão, f_{cm} ; da resistência à tracção, f_{ctm} ; e dos parâmetros de fractura. Dos parâmetros referidos, foram caracterizados experimentalmente, no presente programa experimental, E_c e f_{cm} . Com base nas relações força-flecha vertical obtidas em ensaios de flexão efectuados segundo as recomendações do RILEM TC 162-TDF e recorrendo a análise inversa por intermédio da simulação numérica destes ensaios (ver Figura 3), obtiveram-se os parâmetros que permitem definir o comportamento pós fendilhado do betão desenvolvido [2].

Os valores de E_c e f_{cm} foram obtidos por intermédio de ensaios com provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, enquanto que o comportamento pós fendilhado foi caracterizado por meio de ensaios com prismas de 150 x 150 x 600 mm³. As propriedades resistentes do betão dependem, entre outras, da sua idade. A análise dos casos de carga a que uma aduela pré-fabricada está sujeita durante a sua vida útil deve ser efectuada recorrendo às propriedades do betão na idade em que determinada acção ocorre. Neste sentido, os ensaios experimentais foram efectuados às 24 horas (idade considerada para o armazenamento) e aos 14 dias (idade considerada para a instalação das aduelas na sua disposição final) após a moldagem dos provetes.

Na figura 4 estão representadas as curvas obtidas em ensaios de carga com três apoios em faixas de laje armadas longitudinalmente (150x170x800 mm³), cuja resistência média à compressão aos 28 dias foi de, aproximadamente, 50 MPa. Com o intuito de se determinar o ganho de resistência derivado da adição de fibras de aço, a armadura convencional manteve-se constante. O aumento da capacidade resistente das faixas de laje reforçadas com fibras foi de cerca de 90 por cento e 115 por cento para as faixas de laje armadas e reforçadas com 60 kg/m³ e 75 kg/m³ de fibras metálicas, respectivamente. Este acréscimo de resistência demonstra a grande eficácia dos mecanismos de reforço proporcionados pelas fibras.

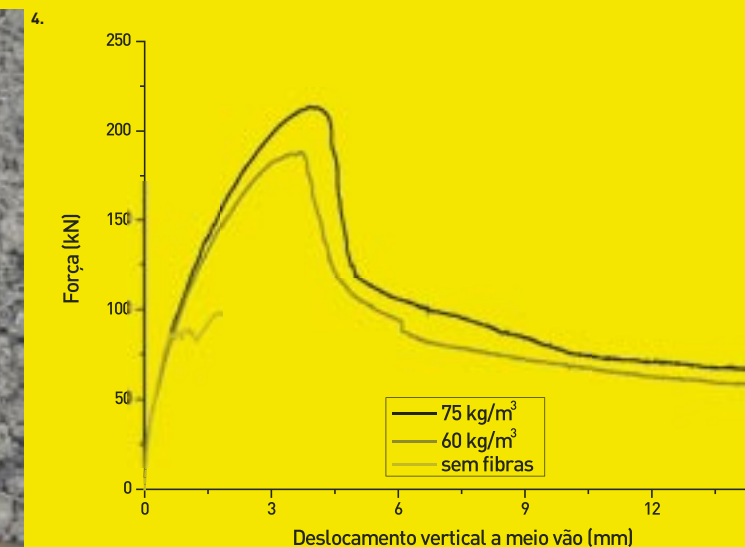
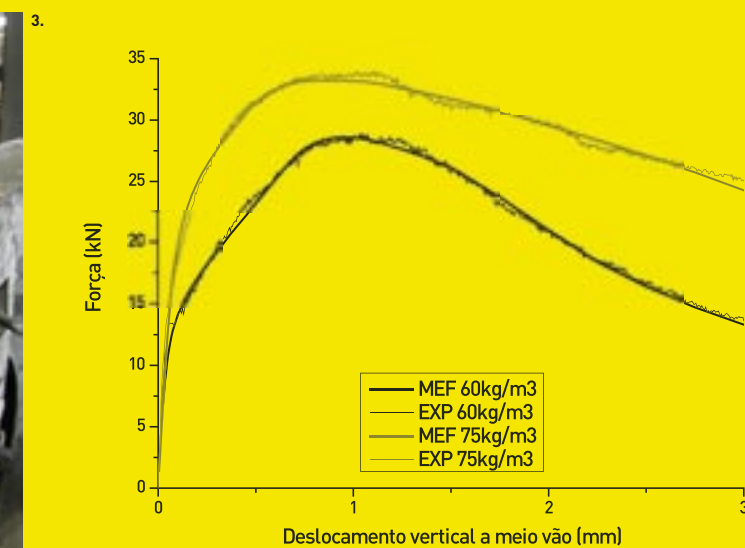
INVESTIGAÇÃO NUMÉRICA

Na tecnologia de túneis revestidos com aduelas pré-fabricadas, um anel é constituído, normalmente, por sete aduelas, sendo uma delas a de fecho. Atendendo à semelhança geométrica de todos os elementos (pequenas variações, com excepção da aduela de fecho), é considerada suficiente a realização das simulações numéricas do comportamento de apenas uma aduela, cujas características estão apresentadas na figura 5. O dimensionamento das aduelas passa pela análise de duas etapas do "ciclo de vida" destes elementos: uma inicial, designada por "fase

1. Armadura convencional no reforço de aduelas pré-fabricadas
2. Betão com a inclusão de fibras discretas de aço

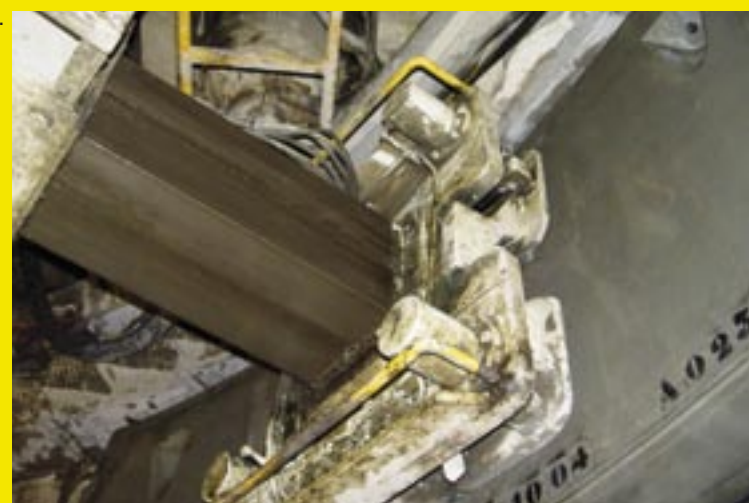
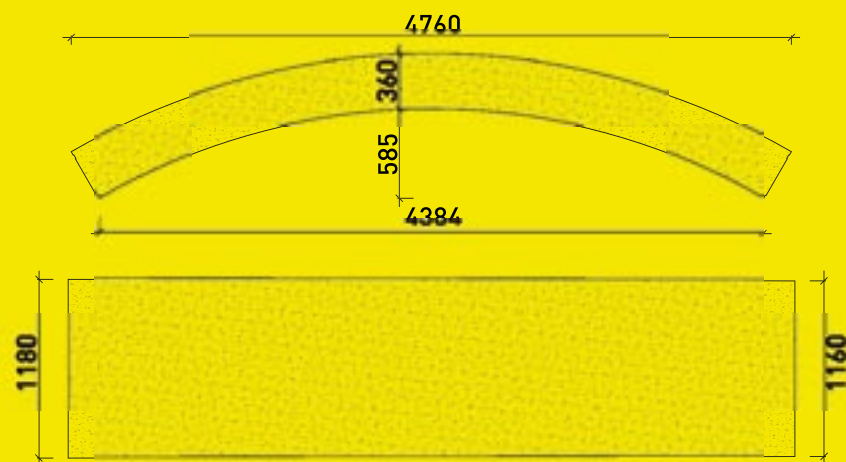
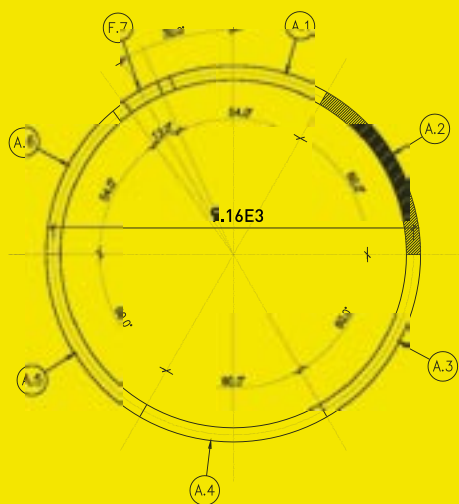


3. Análise inversa de ensaios de flexão
4. Ensaios de carga com três apoios em faixas de laje



5. Aduela tipo analisada

6. Armazenamento

7. Manipulação pelo erector da tuneladora
8. Instalação pelo escudo

de construção”, englobando armazenamento (figura 6), transporte, manipulação pelo erector da tuneladora (figura 7) e a instalação pelo escudo (figura 8); uma outra, correspondente ao comportamento a longo prazo, nomeadamente, à acção do solo ou do maciço rochoso e/ou níveis freáticos sobre os anéis.

A instalação das aduelas, na sua disposição final, efectua-se por intermédio de macacos hidráulicos. Em geral, esta fase corresponde ao carregamento mais desfavorável ao longo da vida útil das aduelas pré-fabricadas, dada a possibilidade de existência de pequenos desalinhamentos de montagem entre os elementos pré-fabricados, que estarão na base do desenvolvimento de uma elevada concentração de tensões na aduela que se instala.

Os casos de carga referidos foram previamente analisados em regime linear e elástico. Esta análise numérica prévia teve como principal objectivo o fornecimento de alguns dados que permitissem constatar a possibilidade da substituição da armadura convencional por fibras de aço, na medida em que possibilitou a obtenção do tipo e da magnitude dos esforços a que uma aduela está sujeita durante o seu tempo de vida útil. Permitiu, igualmente, determinar os casos de carga que condicionam, de forma preponderante, o dimensionamento das aduelas.

O primeiro passo para a realização das análises numéricas foi a obtenção de uma malha com grau de refinamento que garantisse estabilidade de resultados, com tempo de cálculo não demasiado elevado. A aduela foi discretizada em 9600 elementos tridimensionais de 20 nós (também designados por elementos de sólido), totalizando 45213 nós. Para as análises numéricas em regime não linear material admitiu-se que a aduela é um elemento estrutural submetido a um estado plano de tensão (só admissível em alguns casos de carga que são, no entanto, os que condicionam o dimensionamento da aduela). A malha adoptada para este caso foi constituída por 1400 elementos bidimensionais de oito nós. A análise numérica efectuada baseou-se no método dos elementos finitos. Recorreu-se, para tal, ao programa de cálculo automático FEMIX V4.0 [3]. No presente artigo apresentam-se, em síntese, os resultados obtidos para o caso de carga que condiciona, de forma mais significativa, o dimensionamento das aduelas – a instalação. Os resultados obtidos para os restantes casos de carga estão apresentados, de forma mais detalhada, em [2].

Atendendo à magnitude dos valores obtidos (tensões de tracção ≈ 7 MPa – figura 9), a análise em regime linear não permitiu simular, com rigor suficiente, o comportamento da aduela sob este carregamento. Além disso, a eventual existência de desalinhamentos agrava, significativamente, a magnitude dos esforços obtidos. Assim, a análise em regime não linear material foi centrada neste caso de carga. Inicialmente, analisou-se a instalação das aduelas numa situação considerada “ótima”, isto é, não se prevendo qualquer desalinhamento de montagem entre aduelas. O campo de tensões obtido, segundo a direcção da aplicação das cargas pode ser observado na figura 10 (valores em kPa). Os resultados obtidos permitiram concluir que, para esta situação, as composições definidas com betão reforçado com fibras de aço apresentam resistência suficiente para as cargas previstas durante a instalação das aduelas.

Contudo, e como referido em pontos anteriores, no decorrer do processo de instalação é corrente a existência de pequenos desalinhamentos entre aduelas, que alteram, de forma significativa, as condições de fronteira admitidas na análise anterior. Na figura 11 representa-se o campo de tensões obtido segundo X3 (aplicação das cargas pelos macacos hidráulicos) devido à ocorrência de um desalinhamento da aduela de

fecho durante o processo de instalação. Salienta-se que, admitindo um desalinhamento da aduela de fecho superior a 0.3 mm, a magnitude das tensões instaladas é superior relativamente à situação considerada “ótima”, originando a ocorrência de um maior número e abertura de fendas na aduela que se instala (a abertura máxima de fenda estimada é aproximadamente o dobro, relativamente à situação considerada “ótima”), com as patologias associadas.

A verificação da resistência à flexão das soluções de reforço propostas para as aduelas pré-fabricadas foi efectuada comparando os momentos resistentes obtidos para as diversas soluções. Recorrendo ao *software* DOCROS [4], obtiveram-se as curvas momento curvatura da secção das aduelas para as diferentes composições desenvolvidas (figura 12). Com o objectivo de se observar o efeito da presença das fibras de aço, apresenta-se, também, a título indicativo, a curva momento curvatura para um betão com classe de resistência idêntica (C40/50), mas sem qualquer inclusão de fibras. Com base nos valores referidos, constata-se que somente a composição BRFA75 poderá corresponder de forma satisfatória aos esforços a que uma aduela estará sujeita durante o longo prazo, se admitirmos os esforços de projecto previstos para o Metro de Lisboa.

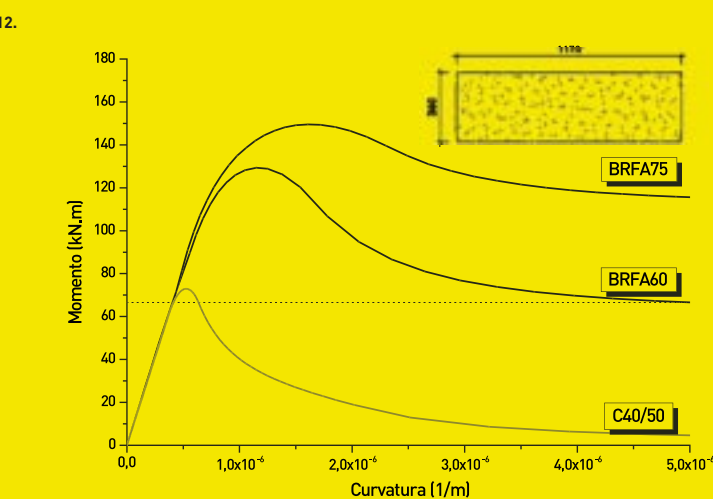
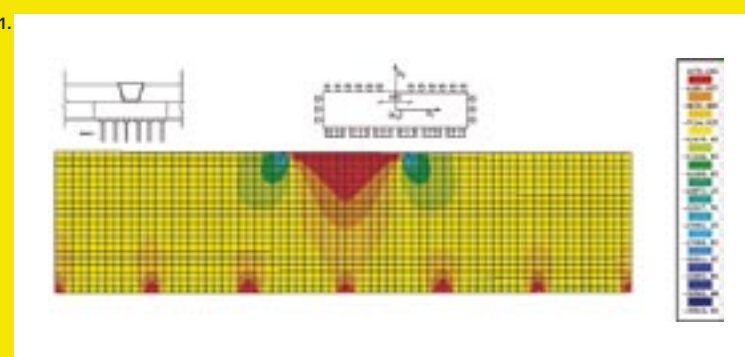
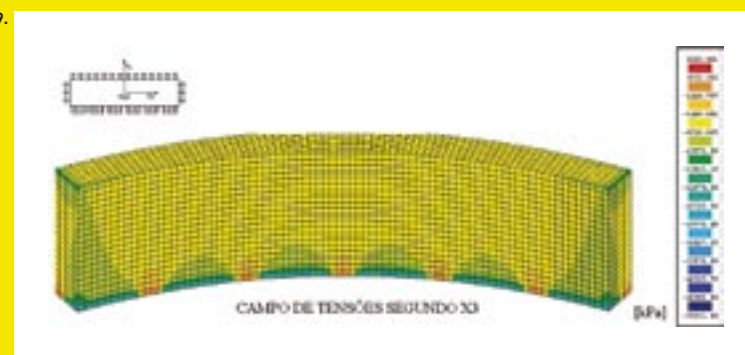
FABRICO DE ADUELAS PRÉ-FABRICADAS EM BRFA

Neste ponto, e em síntese, descrevem-se algumas particularidades que deverão ser tidas em conta para que a substituição da armadura convencional por fibras de aço possa ser efectuada com êxito:

- O BRFA não é um material usualmente adoptado na pré-fabricação de elementos estruturais. Neste sentido, a aplicação deste tipo de material em obras de importância elevada, como a construção de túneis, obriga a um controlo de qualidade diferente do adoptado para o betão normal; este controlo de qualidade poderá não estar apreendido pelos intervenientes em todo o processo construtivo. Por exemplo, a homogeneidade na distribuição das fibras deverá ser controlada periodicamente.
- A compactação do betão mediante a vibração do molde pode originar a segregação do betão e/ou uma distribuição não isotrópica das fibras na aduela, em consequência de sobre-vibração. O tempo de vibração deverá ser, assim, fixado com base em amassaduras piloto. Não devem ser utilizados vibradores do tipo agulha durante qualquer fase do processo de fabrico.
- A utilização de elevada dosagem de fibras metálicas introduz algumas dificuldades no fabrico do betão, dado o maior atrito interno do material compósito na fase de amassadura. Mesmo que o processo de adição das fibras metálicas seja efectuado de forma automática (obriga a um sistema de dosagem automática com precisão aproximada de 1 por cento), o tempo de mistura terá de ser forçosamente aumentado para assegurar uma mistura homogênea das fibras metálicas no betão.
- O processo de acabamento das superfícies dos elementos pré-fabricados é mais moroso do que para um betão sem qualquer adição de fibras, especialmente no que diz respeito ao nivelamento da superfície (figura 13). Com a passagem do nivelador, algumas ancoragens das fibras podem mover-se, deixando algumas irregularidades na superfície do betão.
- Relativamente à resistência ao impacto e à durabilidade, a adição de fibras apresenta alguns benefícios. Como já foi referido, o ciclo de vida dos segmentos pré-fabricados passa pelas seguintes quatro fases: produção, transporte, instalação e serviço. Devido a impactos que ocorrem durante as três primeiras fases referidas, existe uma probabilidade elevada de ocorrência de destacamentos de partes

9. Campo de tensões na direcção de aplicação das cargas (análise linear)
10. Campo de tensões na direcção de aplicação das cargas (análise não linear material)
11. Campo de tensões admitindo a existência de um desalinhamento de montagem

12. Momento-curvatura
13. Acabamento da superfície da aduela em BRFA
14. Pontos de oxidação no betão devidos à corrosão das fibras metálicas



da superfície das aduelas. Neste sentido, uma armadura em malha convencional ficará exposta ao meio ambiente, o que levará a um início precoce do processo de corrosão da armadura. É clara, assim, a vantagem da utilização das fibras de aço: estas estarão presentes em todo o volume do betão, resultando num aumento da resistência ao impacto. Em consequência, a opção por um reforço constituído por fibras de aço pode reduzir o número de aduelas danificadas.

→ As fibras de aço próximas da superfície do betão estão normalmente expostas à humidade e, potencialmente, sofrerão corrosão. Contudo, não se prevê o desencadear de uma corrosão contínua em todo o reforço devido ao facto de cada fibra estar individualmente rodeada e, neste sentido, protegida pelo betão. O surgimento de alguns pontos de oxidação na superfície do betão será a única desvantagem a apontar ao fenómeno de corrosão das fibras metálicas (figura 14).

CONCLUSÕES

A análise das condições de carregamento a que uma aduela está sujeita durante a sua vida útil permitiu constatar a existência de estados de tensão que poderão conduzir ao aparecimento de danos irreversíveis nestes elementos pré-fabricados. Salienta-se a fase crítica de instalação das aduelas, na sua disposição final, agravada pela existência comum de ligeiros desalinhamentos de montagem. Os casos de carga que condicionam o dimensionamento do reforço a instalar nas aduelas pré-fabricadas são a aplicação das aduelas na sua disposição final e o comportamento a longo prazo.

A magnitude dos esforços obtidos, bem como a largura prevista para as fendas, permitiram constatar que é possível a substituição total da

armadura convencional por um sistema de reforço em fibras de aço. Contudo, qualquer conclusão definitiva só poderá ser assumida após ensaios experimentais em elementos estruturais à escala real. Importa ainda avaliar soluções de substituição parcial de armadura convencional por fibras de aço.

Sendo a aplicação de aduelas em BRFA uma alternativa para o revestimento de túneis, o comportamento destes elementos sob a acção do fogo é determinante para aceitação deste compósito como alternativa competitiva e segura na fabricação de aduelas. Os autores do presente trabalho encontram-se presentemente a desenvolver investigação nesta área.

Lúcio Lourenço é Mestre em Engenharia Civil (Universidade do Minho)
Joaquim Barros é Professor Associado com Agregação na Universidade do Minho
Vitor Dinis é Engenheiro Civil na Spiebatignolles
Simão Santos é Engenheiro Civil (Universidade do Minho)

REFERÊNCIAS

- [1] RAMOS *et al.* - "Informe final del análisis del uso de fibras metálicas como único refuerzo del hormigón de las dovelas del túnel de la línea 9 del metro de Barcelona", Informe C5065/F, Departamento de Ingeniería de la Construcción, Universitat Politècnica de Catalunya, Octubre, 2003, 46 p.
- [2] LOURENÇO *et al.* - "Análise estrutural de aduela prefabricada em betão reforçado com fibras para o revestimento de túneis", Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas 2006, Dezembro, Lisboa, 15p.
- [3] AZEVEDO *et al.* - "Software no ensino e no projecto de estruturas", III Congresso Luso Moçambicano de Engenharia, p. 81-92, 19-21 Agosto 2003.
- [4] RIBEIRO *et al.* - "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, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, 59 p., Novembro 2003.

AGRADECIMENTOS

Os autores pretendem agradecer o apoio disponibilizado pela FCT (Projecto FICOFIRE - POCTI/ECM/57518/2004), Spie Batignolles, Civitest, Secil, Sika, Bekahert e DuroEuropa.