

## Durabilidade de Betões Reforçados com Fibras de Aço



Aires Camões<sup>1</sup>



André Costeira<sup>2</sup>

### RESUMO

A durabilidade das estruturas é uma preocupação a nível mundial devido ao número crescente de estruturas degradadas. Como é sabido, de forma a garantir uma adequada durabilidade do betão, devemos especificar outros requisitos para além do comportamento mecânico. A interação entre a camada superficial do betão com o meio ambiente é essencial para o início de diversos processos de degradação e, no betão reforçado com fibras de aço, as fibras apresentam-se muitas vezes à superfície. Assim, torna-se necessário avaliar as propriedades de transporte de agentes agressivos para o interior das estruturas, que a longo prazo possam, eventualmente, afetar a sua durabilidade. Para os betões convencionais, sem inclusão de fibras de aço, existem indicadores de durabilidade que são de utilização corrente. No entanto, para betões reforçados com fibras de aço a bibliografia é escassa e os aspetos relacionados com a durabilidade, nomeadamente com a resistência à corrosão, estão tratados de uma forma ainda incipiente, suscitando, por exemplo, a dúvida se a corrosão das fibras pode, ou não, provocar o destacamento do betão envolvente. Neste seguimento, desenvolveu-se um trabalho experimental com o objetivo de analisar e comparar os resultados de ensaios de durabilidade em provetes de betão reforçado com fibras de aço e em provetes de betão sem fibras. Foram realizados nove ensaios diferentes com intuito de caracterizar o comportamento mecânico (resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e comportamento à tração por flexão) e avaliar parâmetros indicadores de durabilidade (absorção de água por imersão e capilaridade, profundidade de penetração de água sob pressão, resistividade elétrica e difusão por migração de cloretos em regime não estacionário). Os resultados obtidos para os diferentes betões, com períodos de cura até 28 dias, são apresentados e analisados.

**Palavras-chave:** durabilidade, betão reforçado com fibras de aço, corrosão

### 1. INTRODUÇÃO

A permeabilidade do betão com razão A/C inferior a cerca de 0.45 é quase insignificante numa situação em que não haja fendas. No entanto, a permeabilidade é largamente aumentada em serviço, em fase fendilhada, e aumenta com a largura de fenda [1, 2]. Assim, o principal fator que pode

---

<sup>1</sup> C-TAC, Universidade do Minho, 4800-058 Guimarães, Portugal. aires@civil.uminho.pt

<sup>2</sup> Universidade do Minho, 4800-058 Guimarães, Portugal. ag.costeira@gmail.com

diferenciar a permeabilidade do BRFA da do betão convencional em fase fendilhada é a presença e a quantidade de fibras.

Rapoport *et al.* [3] analisou os efeitos associados à incorporação de diferentes volumes de fibras de aço (0%, 0,5% e 1%) em amostras fissuradas de BRFA. As amostras foram fissuradas induzindo-lhes 6 diferentes larguras de fenda (0, 100, 200, 300, 400 e 500  $\mu\text{m}$ ) e, posteriormente, foram então sujeitas a testes de permeabilidade à água com baixas pressões. Após a realização dos ensaios, duas características detetadas destacam-se. A primeira é que, em níveis mais elevados de fenda, as fibras de aço claramente reduzem a permeabilidade. A série de testes em BRFA com 1% de fibras reduz mais a permeabilidade do que a série de testes com 0,5%, permitindo concluir que maiores quantidades de fibras reduzem a permeabilidade. Para além disso, e em segundo lugar, as fibras de aço distribuem a tensão mais uniformemente. A tensão é criada à volta de diversas fendas causando a abertura de várias fendas mais pequenas e não há concentração de dano em uma única grande fenda. Como a permeabilidade está relacionada com a largura de fenda, várias fendas menores serão menos permeáveis do que uma grande fenda. No entanto, para alguns volumes de fibra, pode ser alcançado um valor ótimo acima do qual mais fibras aumentarão a permeabilidade [4]. Pelo mesmo autor foi concluído que, para aberturas de fenda inferiores a 100  $\mu\text{m}$ , a presença de fibras parece não influenciar a permeabilidade do BRFA.

Apesar de não considerar a fase fendilhada, para betões convencionais, sem inclusão de fibras de aço existem indicadores de durabilidade que são de utilização corrente. No entanto, para BRFA a bibliografia é escassa e os aspetos relacionados com a durabilidade, nomeadamente com a resistência à corrosão, estão tratados de uma forma ainda incipiente, suscitando, por exemplo, a dúvida se a corrosão das fibras pode, ou não, provocar o destacamento do betão envolvente.

Deste modo, a durabilidade dos BRFA é um assunto de estudo ainda em expansão e, como tal, a necessidade de se obterem indicadores que a caracterizem é grande. Neste seguimento, desenvolveu-se um trabalho experimental com o objetivo de analisar e comparar os resultados de ensaios de durabilidade, efetuados em provetes de BRFA e em provetes de betão sem fibras (BSF). Foram realizados nove ensaios diferentes com o intuito de caracterizar o comportamento mecânico (resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e resistência à tração por flexão) e avaliar parâmetros indicadores de durabilidade (absorção de água por imersão e capilaridade, profundidade de penetração de água sob pressão, resistividade elétrica e difusão por migração de cloretos em regime não estacionário). Os resultados obtidos para os diferentes betões, com períodos de cura até aos 28 dias de idade, são apresentados e analisados.

## **2. CORROSÃO E CORROSÃO SUPERFICIAL DAS FIBRAS DE AÇO**

Os processos de corrosão das fibras de aço no BRFA têm sido objeto de estudo nos últimos anos, sendo opinião geral que a corrosão no BRFA é menos gravosa quando comparada com a corrosão das armaduras ordinárias do betão armado [5]. No entanto, e citando o mesmo autor, *“The corrosion of the fibres not only could produce the spalling of concrete but it could also reduce the sectional area of the fibres, turning the durability of structures in danger.”*

É de conhecimento geral que a interação entre a camada superficial do betão com o meio ambiente é essencial para o desenvolvimento dos diversos processos de degradação. Um indicador geralmente usado na avaliação da durabilidade está relacionado com as propriedades de transporte da camada superficial do betão [6]. A distribuição das fibras dentro da matriz e o facto de, geralmente, não existir uma camada de recobrimento exterior protetor, como acontece no betão armado, faz com que partes destas se encontrem desprotegidas, podendo sofrer corrosão superficial como documenta a Fig. 1.

A durabilidade das fibras de aço está condicionada ao seu confinamento num meio fortemente alcalino (pH superior a 12,5) como o do betão, em que estas permanecem passivadas [8]. Contudo, a menor abertura de fenda, associada à descontinuidade das fibras (que não permite a formação de grandes

ligações ânodo-cátodo), faz com que estas estejam menos suscetíveis aos agentes corrosivos do que as armaduras convencionais, sendo que a razão A/C é o principal fator que pode fazer variar a corrosão superficial [7]. Segundo estes autores, para relações A/C superiores a 0.5 todas as fibras situadas numa camada superficial, a uma profundidade inferior a 10 mm, sofrem sinais graves de corrosão após exposição a ambiente rico em cloretos. É, também, concluído pelos referidos autores e por [9] que a diminuição da razão A/C para valores inferiores a 0.5 não advém melhorias muito significativas na corrosão superficial.



Figura 1. Corrosão superficial em BRFA [7].

A bibliografia reporta [8], também, que as forças expansivas de corrosão das fibras não são suficientes para o destacamento do betão dado que, devido ao seu diâmetro reduzido, o aumento de volume produzido pelos óxidos resultantes do processo corrosivo não é suficiente para provocar o destacamento do betão envolvente.

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 3.1 Materiais e composições

No Quadro 1 são apresentadas as composições dos betões analisados. O cimento utilizado em todas as composições foi do tipo CEM I 42,5R e da marca Secil. No presente trabalho experimental foram usadas fibras de aço designadas comercialmente como DRAMIX RC 80/60 BN. Na designação RC 80/60 BN, o valor 60 corresponde ao comprimento da fibra ( $l_f = 60$  mm) e o valor 80 à sua esbelteza ( $l_f/d_f$ ), em que  $d_f$  é o diâmetro da fibra, sendo este de 0.75 mm; a letra “R” significa que a extremidade é do tipo *hooked end* para uma melhor ancoragem à matriz cimentícia; “C” designa que vêm aglomeradas em banda, sendo que após contacto com a água da amassadura se dispersam facilmente; “B” significa que têm um acabamento galvanizado e; por fim, “N” caracteriza o tipo de aço, neste caso pobre em carbono. Nas duas composições foi utilizada uma areia fina rolada de rio, uma areia britada (0/4) e uma brita (6/12). O superplastificante (SP) utilizado foi o Glenium Sky 526, à base de polímeros de éter policarboxílico.

Quadro 1. Composição dos betões (dosagens para 1 m<sup>3</sup> de betão).

Betão	Cimento [kg]	Areia fina [kg]	Areia britada [kg]	Brita [kg]	Água [L]	SP [L]	Fibras de aço [kg]
BSF	300	570	576	785	150	5	-
BRFA							30

BSF – betão sem fibras;

BRFA – betão reforçado com fibras de aço.

#### 3.2 Ensaios

Por intermédio dos ensaios realizados procurou-se avaliar a trabalhabilidade, o comportamento mecânico e, sobretudo, a durabilidade dos betões produzidos.

De modo a caracterizar o comportamento em fresco, realizaram-se ensaios de abaixamento de acordo com a NP EN 12350-2 [10]. A caracterização mecânica das misturas produzidas incidiu no estudo da variação ao longo do tempo (7 e 28 dias) da resistência à compressão, da resistência à tração por compressão diametral e do comportamento em flexão. Complementarmente à avaliação das características mecânicas, as propriedades no estado endurecido das misturas produzidas foram avaliadas, recorrendo a ensaios de durabilidade. Os ensaios realizados para a avaliação da durabilidade foram realizados em provetes de BRFA e de BSF com 28 dias de idade e incidiram na determinação da absorção de água por imersão à pressão atmosférica, absorção de água por capilaridade, permeabilidade à água, coeficiente de difusão de cloretos por migração em regime não estacionário e na avaliação da resistividade (com o resistivímetro de Wenner).

Assim, foram fabricados e conservados imersos em água após a desmoldagem (que ocorreu no dia seguinte ao da betonagem) até à data de ensaio provetes para os seguintes ensaios: resistência à compressão (NP EN 12390-3 [11]) – 6 provetes cilíndricos (150 mm de diâmetro e 300 mm de altura) de BRFA e 6 de BSF; resistência à tração por compressão diametral (NP EN 12390-6 [12]) – 2 provetes cilíndricos (150 mm de diâmetro e 300 mm de altura) de BRFA e 2 de BSF; comportamento à flexão (RILEM TC162-TDF [13]) – 3 prismas retangulares (100x100x850 mm<sup>3</sup>) para BRFA e 3 para BSF; absorção de água por imersão à pressão atmosférica (LNEC E394 [14]) – 3 provetes cúbicos com 150 mm de aresta para BRFA e 3 para BSF; absorção por capilaridade (LNEC E393 [15]) – 3 provetes cúbicos com 150 mm de aresta para BRFA e 3 para BSF; profundidade de penetração de água sob pressão (NP EN 12390-8 [16]) – 3 provetes cúbicos com 150 mm de aresta para BRFA e 3 para BSF; resistividade elétrica (RILEM TC 154-EMC [17]) – 3 provetes cúbicos com 150 mm de aresta para BRFA e 3 para BSF; difusão de cloretos por migração em regime não estacionário (LNEC E463 [18]) – 5 provetes cilíndricos (100 mm de diâmetro e 50 mm de altura) para BRFA e 5 para BSF.

## **4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

### **4.1 Estado fresco**

Aquando da realização das amassaduras dos dois betões em estudo, procedeu-se à determinação da sua trabalhabilidade com recurso à realização do ensaio de abaixamento no cone de Abrams. Os resultados apresentam-se no Quadro 2.

Quadro 2. Abaixamento dos betões.

<i>Betão</i>	<i>Abaixamento [mm]</i>
BSF	140
BRFA	120

Conforme previsto, a inclusão de fibras de aço prejudicou a trabalhabilidade do betão. Contudo, as diferenças registadas foram pouco significativas, podendo afirmar-se que a trabalhabilidade das composições parece ser controlada, fundamentalmente, pelo superplastificante adicionado aquando da mistura dos componentes.

### **4.2 Estado endurecido**

#### **4.2.1 Características mecânicas**

A Fig. 2 apresenta a evolução da resistência à compressão ao longo do tempo dos betões fabricados. Por observação desta figura é possível constatar que a incorporação das fibras de aço não alterou, significativamente, a resistência à compressão do betão. No entanto, existem diferenças as resistências à compressão do BSF e do BRFA e estas são visíveis aos 7 dias de idade (7.5%) e acentuam-se aos 28 dias (13.1%), embora sejam relativamente pequenas. Este aspeto era, aliás, já esperado e é comparável aos resultados apresentados por outros autores.

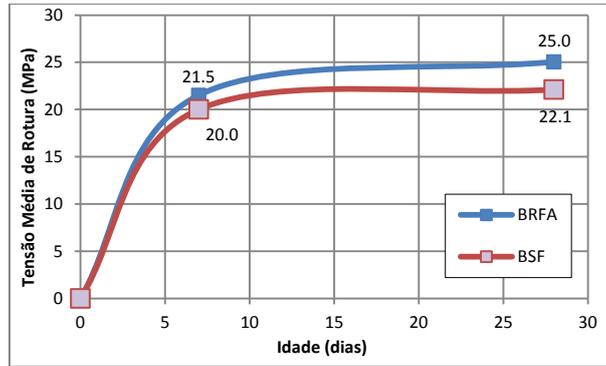


Figura 2. Resultados do ensaio de resistência à compressão.

Na Fig. 3 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral.

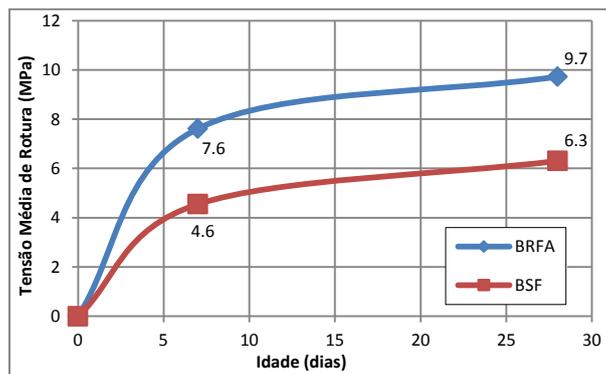


Figura 3. Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Por intermédio da análise dos resultados expressos na Fig. 3 podemos afirmar que a resistência à tração por compressão diametral do BRFA foi bastante superior à do BSF, tendo-se registado um aumento de 65% aos 7 dias e 54% aos 28 dias de idade. Ao que tudo indica, o efeito de costura provocado pela adição das fibras de aço ao betão potenciou a sua capacidade resistente.

A Fig. 4 documenta as curvas médias representativas do comportamento em tração por flexão das composições testadas, expresso pelas respetivas relações força-flecha.

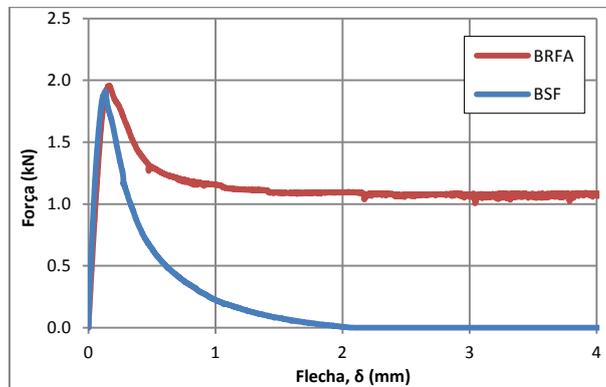


Figura 4. Comportamento em tração por flexão.

No Quadro 3 apresentam-se os valores médios e respetivos coeficientes de variação da resistência à flexão e da energia de fratura, calculadas a partir dos resultados expressos na Fig. 4. Os resultados obtidos confirmaram a maior capacidade de absorção de energia do BRFA em relação ao BSF. Apesar

da resistência à tração por flexão ser praticamente igual, a energia de fratura do BRFA foi bastante superior à do BSF (cerca de três vezes mais).

Quadro 3. Resistência à flexão e energia de fratura dos betões.

Betão	Resistência à flexão		Energia de fratura	
	$f_{ctm,fl}$ [MPa]	coef. variação [%]	$G_{fm}$ [N/m]	coef. variação [%]
BSF	5.0	5.3	108.9	16.5
BRFA	4.8	13.6	320.3	23.2

$f_{ctm,fl}$  – resistência à tração por flexão média.  
 $G_{fm}$  – energia de fratura média.

#### 4.2.2 Indicadores de durabilidade

Conforme se pode constatar por observação da Fig. 5, onde constam os resultados dos ensaios de absorção de água por imersão, a porosidade aberta do BRFA foi superior à do BSF. A porosidade média do BSF foi de 7.2% e a do BRFA de 8.9%, portanto cerca de 24% superior.

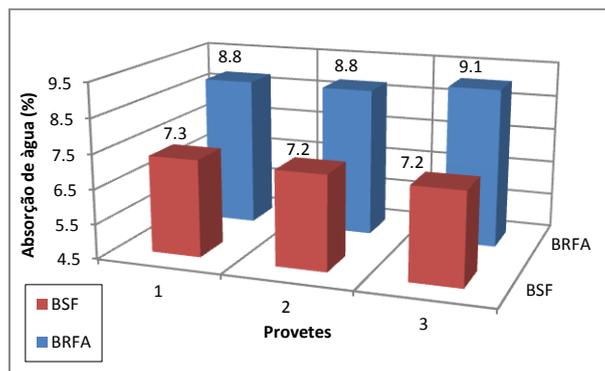


Figura 5. Absorção de água por imersão à pressão atmosférica.

Relativamente à absorção de água por capilaridade, os resultados obtidos e apresentados nas Figs 6 e 7 demonstram que a quantidade total de água absorvida é maior no BRFA mas que o coeficiente de absorção de água por capilaridade é semelhante ao do BSF ( $0.1373 \text{ kg/m}^2/\text{min}^{0.5}$  para o BRFA e  $0.1121 \text{ kg/m}^2/\text{min}^{0.5}$  para o BSF). Assim, a presença das fibras metálicas parece indicar um aumento no número de poros capilares mas aparenta não afetar significativamente a dimensão dos mesmos.

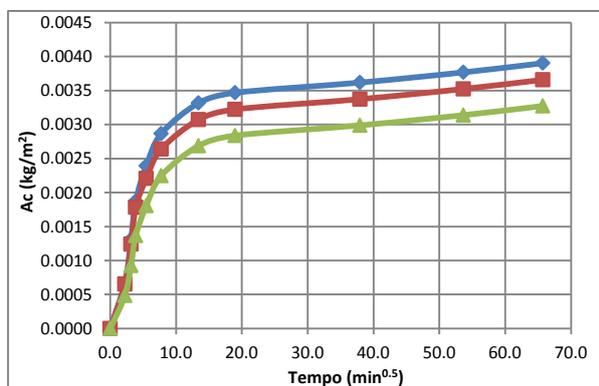


Figura 6. Absorção de água por capilaridade do BRFA.

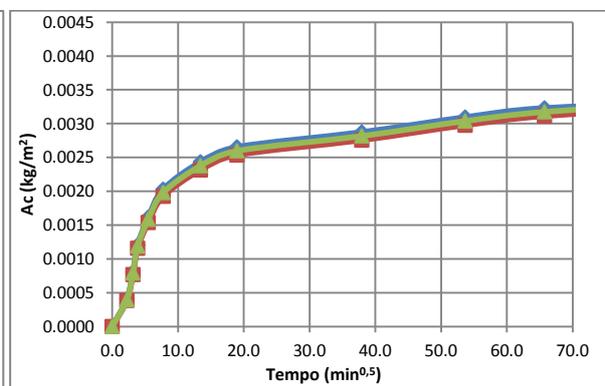


Figura 7. Absorção de água por capilaridade do BSF.

Os ensaios de profundidade de penetração de água sob pressão conduziram aos valores apresentados no Quadro 4 e na Fig. 8. Os resultados confirmam um pior desempenho do BRFA, possivelmente pela maior porosidade aberta, e uma cinética de absorção de água semelhante à revelada no ensaio de absorção capilar de água. É, também, de salientar a elevada dispersão verificada na profundidade de penetração de água sob pressão dos BRFA.

Quadro 4. Profundidade de penetração de água sob pressão.

Betão	Profundidade de penetração de água sob pressão	
	$X_{pm}$ [mm]	Coef. variação [%]
BSF	25.0	21.6
BRFA	33.1	4.2

$X_{pm}$  – profundidade de penetração média.

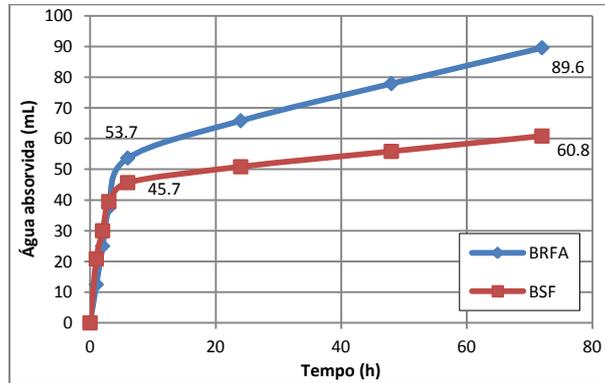


Figura 6. Absorção de água sob pressão.

A resistividade elétrica das composições testadas apresenta-se no Quadro 5. A diferença observada é substancial (diminuição de 43% no BRFA) e poderá indicar que este ensaio não é apropriado para comparar o desempenho de BSF com o de BRFA, pois a presença das fibras de aço pode influir significativamente no campo elétrico gerado pelo resistímetro e mostrado na Fig. 7.

Quadro 5. Resistividade elétrica.

Betão	Resistividade elétrica	
	$\rho_m$ [k $\Omega$ .cm]	coef. variação [%]
BSF	11.1	5.0
BRFA	6.3	15.0

$\rho_m$  – resistividade elétrica média.

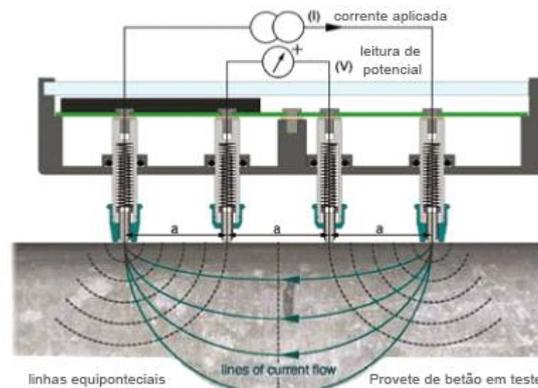


Figura 7. Ensaio de resistividade elétrica com o resistímetro de Wenner.

Os ensaios de determinação do coeficiente de difusão de cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário deram origem aos resultados apresentados no Quadro 6. Neste quadro, é possível verificar que a resistência à penetração de cloretos é, aparentemente, superior no BRFA, pois é dotado do menor coeficiente de difusão. No entanto, a comparação entre BRFA e BSF no ensaio de migração pode não ser imediata, uma vez que a presença das fibras de aço poderá fazer com que os iões de cloreto se fixem preferencialmente nas fibras e assim, poderá retardar, ou mesmo impedir, a penetração dos iões na matriz. Aliás, no decurso do ensaio foi possível observar a formação de material corroído na solução catódica nos ensaios do BRFA e esta foi aumentando com a duração do

ensaio. Nas Figs 8 e 9, é possível visualizar as diferenças verificadas nas soluções durante o ensaio de BRFA e de BSF.

Quadro 6. Coeficiente de difusão de cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário.

Betão	Coeficiente de difusão	
	$D_m$ [ $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s]	coef. variação [%]
BSF	18.1	2.6
BRFA	11.4	7.2

$D_m$  – coeficiente de difusão médio.



Figura 8. Ensaio de migração de cloretos de BRFA em curso, após 6 horas (esquerda) e 24 horas (direita).



Figura 9. Ensaio de migração de cloretos de BSF em curso, após 6 horas (esquerda) e 24 horas (direita).

## 5. CORROSÃO DAS FIBRAS DE AÇO

Com o desenvolvimento do ensaio de migração de cloretos detetou-se que a solução catódica apresentava sinais claros de corrosão das fibras de aço. As próprias amostras de BRFA após o ensaio de migração evidenciaram indícios de corrosão na superfície exterior, e fendas ao longo da sua superfície exterior (Fig. 10). Tal deverá ter sido originado pelo aumento do diâmetro associado à corrosão das fibras, dado que, conforme sabido, a formação de óxido de ferro implica um aumento do volume da fibra. Esta fendilhação foi apenas detetada nos provetes de BRFA submetidos ao ensaio de migração, não havendo vestígios da sua formação nos provetes de BSF.

Neste contexto, decidiu-se submeter ao ensaio de migração de cloretos outros provetes de BRFA, mas agora não com a preocupação de determinar o coeficiente de difusão e cumprir o estipulado na LNEC E463 [20] mas sim de induzir corrosão acentuada nas fibras de aço. Para tal, os provetes foram sujeitos a uma diferença de potencial de 45 V durante 72 horas. Desta forma observou-se que, à medida que os ensaios decorriam, as fibras de aço apresentavam sinais crescentes de degradação. A Fig. 11 ilustra a degradação sofrida pelas fibras de aço após 72 horas de ensaio, sendo possível observar fortes indícios de corrosão e uma diminuição da secção ao longo da fibra de aço.



Figura 10. Provete de BRFA após ensaio de migração de cloretos.



Figura 11. Corrosão das fibras de aço do BRFA após 72 horas de ensaio de migração de cloretos.

Mais ainda, este ensaio, realizado em condições extremas de agressividade, permitiu evidenciar que a corrosão das fibras de aço pode induzir o surgimento de macro-fendas no betão envolvente e posterior destacamento. Os resultados obtidos neste processo experimental foram elucidativos, tendo sido verificado, em alguns provetes, a rotura da secção transversal das fibras de aço, como se pode verificar nas Figs 12 e 13, onde o efeito da corrosão das fibras é bem evidente. Contudo, devemos salientar que este estado foi obtido para condições de extrema agressividade cuja quantificação não é facilmente comparável com a provocada pelos agentes agressivos presentes no meio ambiente. Provavelmente, nunca se atingirá *in-situ* um estado de degradação tão extremo como o alcançado experimentalmente, recorrendo ao procedimento descrito.



Figura 12. Macro-fissuração e destacamento do betão devido à corrosão das fibras de aço no BRFA após ensaio forçado de migração de cloretos.



Figura 13. Superfície de fratura após macro-fissuração e destacamento do betão devido à corrosão das fibras de aço no BRFA.

## 6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos nos ensaios indicadores de durabilidade, é possível concluir que:

- a adição das fibras de aço originou um aumento da porosidade aberta;
- a adição de fibras de aço não alterou significativamente a cinética de absorção de água por capilaridade, indiciando que a dimensão dos poros capilares não foi substancialmente alterada;
- no ensaio de profundidade penetração de água sob pressão verificou-se um acréscimo da profundidade de penetração da água no BRFA;
- a resistividade elétrica de um BRFA, determinada com o resistivímetro de Wenner, pode não ser diretamente comparável com a de um BSF, devido à interferência no campo elétrico associado à presença de fibras de aço na matriz;
- a determinação do coeficiente de difusão por ensaio de migração de cloretos em regime não estacionário pode não ser viável para um BRFA uma vez que a metodologia de ensaio pode provocar corrosão significativa das fibras de aço e os cloretos podem ter tendência a fixar-se nas fibras metálicas;

O estudo realizado permitiu concluir, também, que, pelo menos em condições extremas de agressividade, a corrosão das fibras de aço pode induzir macro-fendilhação no betão envolvente e originar o seu consequente destacamento.

## REFERÊNCIAS

- [1] Ludirdja, B. e Young (1989). Simple Method for Measuring Water Permeability of Concrete. *ACI Materials Journal*, vol 86, pp 433-439.
- [2] Wang, K.; Jansen, D.; Shah, S.; Karr, A. (1997). Permeability Study of Cracked Concrete. *Cement and Concrete Research*, pp 381-393.
- [3] Rapoport, J.; Aldea, C.-M.; Shah, S.; Ankenman, B.; Karr, A. (2001) Permeability of Cracked Fibre-Reinforced Concrete. *Technical Report Number 115*, NISS.
- [4] Tsukamoto, M.; Worner, J.-D. (1991). Permeability of Cracked Fibre-Reinforced Concrete. *Darmstadt Concrete*, pp 123-135.
- [5] Granju, J.-L.; Balouch, S. (2004). Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks. *Cement and Concrete Research*, vol 35, pp 572–577.
- [6] Ferreira, M. (2000). Avaliação de Ensaios de Durabilidade do Betão. Universidade do Minho, Dissertação de Mestrado.
- [7] Balouch, S.; Forth, J.; Granju, J.-L. (2010). Surface Corrosion of Steel fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, vol 40, pp 410–414.
- [8] Mangat, P. e Gurusamy, K. (1987). Chloride Diffusion in Steel Fiber-Reinforced Marine Concrete. *Cement and Concrete Research*, vol 17, pp 385-396.
- [9] ACI-544.5R-10. 2010, Report on the Physical Properties and Durability of Fiber-Reinforced Concrete. ACI.
- [10] NP EN 12350-2. 2009, Ensaios do betão fresco - Parte 2: ensaio de abaixamento. Lisboa: IPQ. 11 p.
- [11] NP EN 12390-3. 2009, Ensaios do betão endurecido - Parte 3: resistência à compressão de provetes. Lisboa: IPQ. 21 p.
- [12] NP EN 12390-6. 2011, Ensaios do betão endurecido - Parte 6: resistência à tracção por compressão de provetes. Lisboa: IPQ. 15 p.
- [13] RILEM TC.162-TDF. 2003, Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. *Materials & Structures*, vol 36, pp 560-567.
- [14] LNEC E394. 1993, Betões. Determinação da absorção de água por imersão – ensaio à pressão atmosférica. Lisboa: LNEC. 2 p.
- [15] LNEC E393. 1993, Betões. Determinação da absorção de água por capilaridade. Lisboa: LNEC. 2 p.
- [16] NP EN 12390-8. 2009, Ensaios do betão endurecido - Parte 8: profundidade de penetração da água sob pressão. Lisboa: IPQ. 9 p.
- [17] RILEM TC.154-EMC. 2003, Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion half-cell potential measurements – potential mapping on reinforced concrete structures. *Materials & Structures*, vol 36, pp 461-471.
- [18] LNEC E463. 1993, Betões. Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário. Lisboa: LNEC. 7 p.