

Durabilidade do betão auto-compactável reforçado com fibras de aço

Cristina Frazão¹

Aires Camões²

Joaquim Barros³

Delfina Gonçalves⁴

RESUMO

A durabilidade é um dos aspetos mais importantes que o betão deve garantir, devido à sua fundamental incidência na vida útil das estruturas. Devido ao número crescente de estruturas degradadas prematuramente, a durabilidade das estruturas de betão tem sido uma preocupação constante no meio técnico da construção.

As estruturas de betão reforçado com fibras de aço (BRFA) estão sujeitas à penetração de cloretos e à ação da carbonatação que causam a corrosão das fibras de aço, o que pode influenciar negativamente o desempenho estrutural e a durabilidade do betão.

A investigação da durabilidade do betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (BACRFA) é ainda escassa, nomeadamente, os aspetos relacionados com a resistência à corrosão das fibras, suscitando a dúvida se a corrosão das fibras pode, ou não, provocar o destacamento do betão envolvente.

Neste contexto, foi realizado um trabalho experimental com provetes de BACRFA e provetes de betão auto-compactável (BAC) sem fibras com o objetivo de avaliar os efeitos da corrosão das fibras de aço na durabilidade do BACRFA. Os resultados obtidos para os diferentes betões em estudo são apresentados e analisados.

Palavras-chave: Durabilidade, BACRFA, corrosão, cloretos e carbonatação.

1. INTRODUÇÃO

O betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (BACRFA) combina os benefícios da trabalhabilidade do betão auto-compactável com o aumento da ductilidade consequente da adição de fibras de aço a materiais de matriz cimentícia. Esta combinação origina uma melhoria das características mecânicas do betão, nomeadamente um aumento da resistência residual e uma maior capacidade de absorção e dissipação de energia, após o início da fendilhação da matriz.

Quando as fibras de aço são adicionadas ao betão, a possibilidade de corrosão das fibras é um parâmetro de durabilidade que requer especial atenção. A corrosão é uma das manifestações patológicas que mais degrada as estruturas de betão armado, pelo que, é de todo o interesse analisar os efeitos deste fenómeno no BACRFA.

¹ ISISE, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal. frazao_cristina@hotmail.com

² CTAC, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal. aires@civil.uminho.pt

³ ISISE, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal. barros@civil.uminho.pt

⁴ CiviTest, Vila Nova de Famalicão, Portugal. delfinagoncalves@civitest.com

Os processos de corrosão das fibras de aço têm sido objeto de estudo nos últimos anos, sendo opinião geral que a corrosão no betão reforçado com fibras de aço (BRFA) é menos gravosa quando comparada com a corrosão das armaduras ordinárias do betão armado [1]. Este facto verifica-se dado que a diminuição do diâmetro das fibras por corrosão não diminui significativamente a capacidade resistente da interface fibra-matriz, e conseqüentemente, o comportamento mecânico e a durabilidade das estruturas de BRFA.

As principais causas da corrosão das fibras de aço no BRFA são a penetração de cloretos e a redução do pH da matriz cimentícia causada pela carbonatação [2].

A penetração dos cloretos depende da estrutura porosa do betão e de todos os fatores relacionados com a composição do betão (a razão A/C, tipo e quantidade de adições minerais e de cimento, a cura, etc.) e com a presença de fissuras [3]. Em função das condições de agressividade ambiental, a penetração de cloretos pode ocorrer através de diversos mecanismos de transporte, tais como, permeação, absorção capilar, migração e difusão [4].

A carbonatação depende da permeabilidade do betão e diminui com o tempo de exposição. A penetração do CO₂ inicia-se na superfície do betão, progride, por difusão, enquanto houver CO₂ disponível e reage com a cal proveniente da hidratação do cimento, originando a formação de carbonato de cálcio. Após esta reação, o pH do betão baixa para valores inferiores a 9, destruindo a camada passivadora das fibras de aço, levando à sua corrosão. Quando as fibras perdem esta camada de passivação protetora, o processo de corrosão inicia-se, mantendo-se livres de corrosão as fibras localizadas em maior profundidade. Corinaldesi e Moriconi [5] mediram a profundidade de penetração do CO₂ pelo teste da fenolftaleína [6] em provetes cúbicos de BRFA (100 mm) expostos ao ar à temperatura de 20°C, um dia após terem sido desmoldados. Após 6 meses de exposição, a carbonatação causou corrosão superficial mas não evidenciou indícios de causar destacamento do betão envolvente [5].

Deste modo, torna-se necessário avaliar as propriedades de transporte de agentes agressivos para o interior das estruturas de BACRFA, nomeadamente a permeabilidade, que a longo prazo possam, eventualmente, afetar a sua durabilidade [1, 5, 7, 8, 9].

Os principais fatores que podem diferenciar a permeabilidade do BRFA da do betão convencional são a presença e a quantidade de fibras. Teoricamente, quanto maior o teor de fibras num BRFA, maior será a sua porosidade, devido à perturbação que as fibras causam na compactação da mistura, induzindo um aumento do índice de vazios. Além disso, durante a fase de utilização das estruturas, o betão encontra-se fendilhado e o início e a propagação da abertura de fissura promove o aumento da permeabilidade do betão, favorecendo o ingresso de substâncias nocivas (cloretos, CO₂, sulfatos, etc.) que propiciam a ocorrência da corrosão das fibras. No entanto, a fendilhação no BRFA é mais reduzida porque as fibras restringem a abertura de fissuras e, conseqüentemente, a durabilidade do BRFA pode ser beneficiada.

1.1 Corrosão em fase fendilhada

A durabilidade das fibras de aço está condicionada pelo seu confinamento num meio fortemente alcalino como o do betão (pH superior a 12.5), onde estas permanecem passivadas [10]. No entanto, a menor abertura de fissura, associada à descontinuidade das fibras, 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 [1].

A degradação do betão fendilhado devido à corrosão das fibras, depende de vários parâmetros, nomeadamente, da abertura de fissura, das condições de exposição ambiental e do tipo de fibras [11]. No betão fendilhado, a corrosão tende a ocorrer nas fibras de aço que atravessam as fissuras, provocando a redução da secção das fibras. Esta redução afeta negativamente o comportamento mecânico do BRFA, podendo conduzir a uma significativa redução da resistência residual em tração e

flexão e da capacidade de absorção de energia. Por outro lado, os produtos da corrosão das fibras causam um aumento do atrito fibra/matriz, melhorando o comportamento de arrancamento da fibra e, conseqüentemente, a resistência à flexão dos elementos de BRFA [8]. Se a abertura de fissura for muito reduzida (até 0.1 mm), o processo de auto-regeneração (*self-healing*) recupera a integridade do BRFA, tendo a corrosão das fibras um efeito desprezável em termos de desempenho estrutural e de durabilidade [8].

Granju e Balouch [8] investigaram a corrosão do BRFA em amostras de betão fendilhado, com 0.5mm de abertura de fissura, expostas durante um ano a um ambiente simulado, tipo marinho. As amostras foram submetidas a ciclos de uma semana de imersão em solução de 3.5% NaCl e uma semana de secagem. Pelos resultados obtidos verificou-se que a corrosão das fibras não causou o destacamento (*spalling*) do betão. Apenas as fibras localizadas nas fissuras, numa distância menor que 3 mm da superfície, apresentavam intensa corrosão. Nas fibras a maior profundidade apenas uma leve corrosão foi observada, sem redução da secção da fibra. A corrosão verificada nas fibras concentrou-se no plano da fissura e ao nível da dobra da fibra (Figura 1).

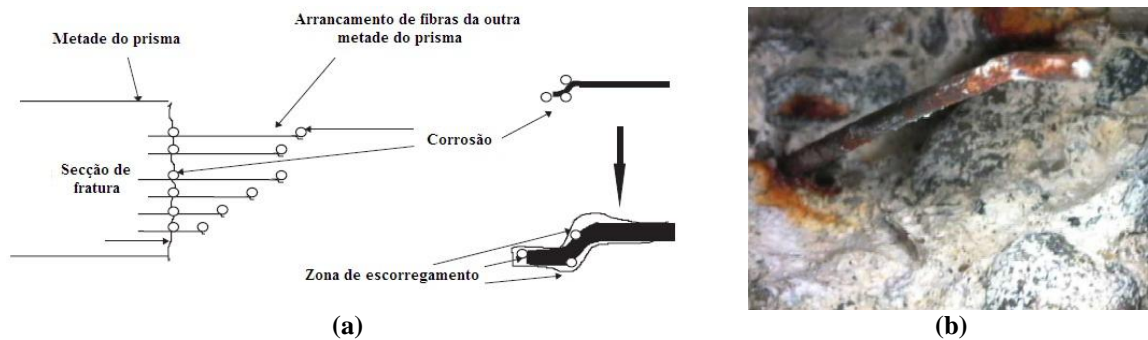
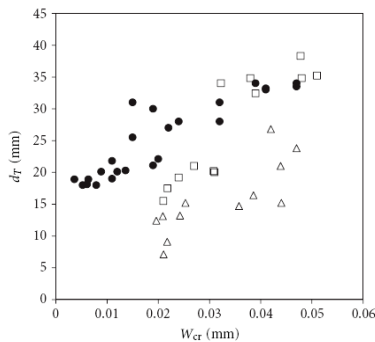


Figura 1. (a) - Detalhe da corrosão observada nas fibras na secção da fissura e (b) - Fotografia da fibra corroída (adaptado de Granju e Balouch [8])

Yoon [12] realizou um estudo para avaliar o efeito da penetração de cloretos através de fissuração em provetes de BRFA. Nos provetes, onde a abertura de fissura foi limitada ao máximo de 0.012 mm, não se verificou penetração de cloretos pela fissuração. O reforço com fibras de aço permite reduzir a penetração de cloretos através das fissuras, uma vez que as fibras reduzem significativamente o comprimento destas (Figura 2). Numa determinada fissura, as fibras provocam o aumento do comprimento crítico da fissura, $d_2 - d_e$, correspondente à abertura de fissura crítica, W_{cr} de 0.012 mm, e diminuem o comprimento efetivo da fissura, d_e (Figura 3).



- Betão convencional
- Betão de elevado desempenho
- △ Betão de elevado desempenho reforçado com fibras de aço

Figura 2. Profundidade de penetração de cloretos na zona da fissura, d_f , em função da abertura de fissura, W_{cr} [12]

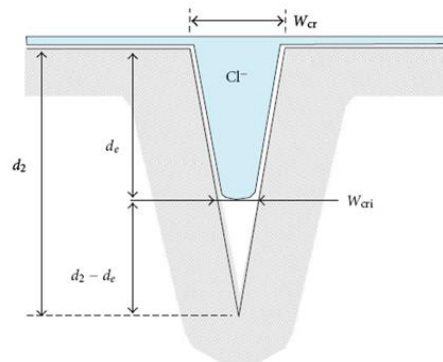


Figura 3. Representação do comprimento efetivo da fissura de acordo com o comprimento crítico da fissura [12]

Solgaard *et al.* realizaram um programa de investigação através de simulações numéricas e ensaios experimentais sobre a suscetibilidade de varões de aço à corrosão por cloretos. Com o intuito de avaliar a influência do reforço com fibras de aço, os varões de aço foram envolvidos, num caso, com betão simples e noutro caso, com BRFA. Através da medição experimental da resistividade elétrica e avaliando as propriedades mecânicas do BRFA, Solgaard *et al.* propuseram um modelo numérico de simulação da formação e propagação de fissuras no betão, causadas por corrosão de varões de aço convencionais. O modelo proposto para além de simular a corrosão dos varões de aço, também simula a corrosão das fibras de aço para uma abertura de fissura máxima de 0.1 mm. Os resultados das simulações indicaram que as fibras do BRFA limitaram a abertura de fissura, tendo atrasado a intensidade de corrosão e os consequentes efeitos prejudiciais. Este benefício do reforço com fibras aumenta com a espessura de recobrimento. Nas Figuras 4 e 5 apresentam-se as relações obtidas de abertura de fissura em função da espessura dos produtos da corrosão (t_{cor}), ao nível do varão de aço e ao nível da superfície do betão, quer no betão simples (BS) como no BRFA [13].

Comparando a Figura 4 com a Figura 5, verifica-se que para uma determinada abertura de fissura ao nível da superfície do betão, uma espessura de recobrimento de 20 mm de BRFA, tem o mesmo efeito em termos de proteção à corrosão dos varões de aço convencional que uma espessura de recobrimento de 40 mm de betão simples. Na Figura 5 verifica-se, também, que para uma espessura de recobrimento de 40 mm, as fibras promovem uma diminuição de 30% da abertura de fissura à superfície do betão, para uma espessura de produtos de corrosão maior que 0.01 mm [13].

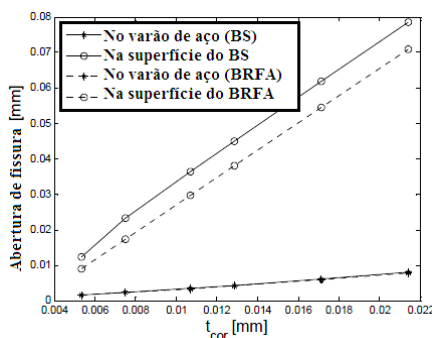


Figura 4. Abertura de fissura vs. espessura dos produtos de corrosão (t_{cor}) para uma espessura de recobrimento de 20 mm [13]

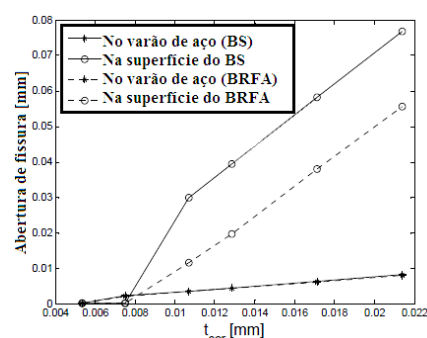


Figura 5. Abertura de fissura vs. espessura dos produtos de corrosão (t_{cor}) para uma espessura de recobrimento de 40 mm [13]

1.2 Corrosão Superficial

A interação entre a camada superficial do betão com o meio ambiente é essencial para o início de diversos processos de degradação e, no BRFA, algumas fibras apresentam-se muitas vezes à superfície, sem camada de recobrimento exterior protetor, podendo sofrer processos de corrosão (Figura 6).

A corrosão superficial afeta negativamente a aparência das superfícies de betão, com o aparecimento de manchas de ferrugem, no entanto, não afeta as propriedades mecânicas do betão [14].

Granju e Balouch [8] estudaram a corrosão do BRFA por penetração de cloretos na superfície do betão. No estudo que realizaram, observaram que, numa matriz cimentícia de elevada porosidade (razão A/C = 0.60), apesar de os cloretos penetrarem alguns milímetros no interior do betão, apenas as fibras localizadas numa espessura exterior inferior a 1 mm, estavam corroídas. O mesmo estudo revelou também que, quando a razão A/C é menor ou igual a 0.5, o mínimo recobrimento superficial, para evitar a corrosão das fibras, é de 0.1 mm [8].

Balouch *et al.* [1] realizaram duas séries de ensaios para determinar o mínimo recobrimento das fibras necessário para prevenir a corrosão superficial e relacioná-lo com a razão A/C e a porosidade do betão.

A primeira série foi realizada com elevada razão A/C (0.78) e dois tipos diferentes de fibras de aço (40 kg/m³), macro-fibras (extremidades dobradas, comprimento = 30 mm, diâmetro = 0.5 mm) e micro-fibras (lisas, comprimento = 13 mm, diâmetro = 0.17 mm). A segunda série foi realizada com betões de diferentes razões A/C: 0.78, 0.48 e 0.36. Foram produzidos prismas de BRFA com 100×100×500 mm³, os quais foram submetidos a ciclos de imersão em solução salina (uma semana) e secagem (uma semana). Após exposição dos prismas às condições de agressividade ambiental, verificou-se que nos prismas da primeira série, com uma elevada razão A/C, todas as fibras embebidas menos que 1 mm no betão, apresentavam sinais de intensa corrosão. Na segunda série, verificou-se que quando a razão A/C foi reduzida para 0.48, o recobrimento mínimo necessário para prevenir a corrosão superficial diminuiu para 0.2 mm. No entanto, reduzir a razão A/C abaixo de 0.48, não produziu nenhum benefício significativo. Os resultados do número de pontos de corrosão, observados ao longo de 3 meses de exposição das vigas, encontram-se representados na Figura 7 [1].

Deste modo, para prevenir a corrosão superficial do BRFA, o betão deverá possuir, simultaneamente, uma razão A/C menor ou igual a 0.5 e um recobrimento mínimo das fibras maior que 0.2 mm. Se estas duas condições não forem cumpridas, o potencial de corrosão das fibras de aço pode ser minimizado, usando fibras galvanizadas [1].



Figura 6. Corrosão superficial em BRFA [14]

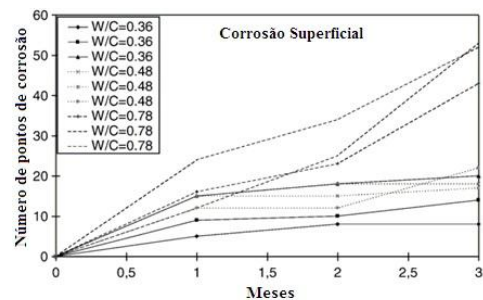


Figura 7. Número de pontos de corrosão vs. período de exposição para diferentes razões A/C (W/C) [1]

Uma alternativa ao uso de fibras de aço comerciais no BRFA, é a utilização de fibras de aço recicladas provenientes de pneus usados. A utilização destas fibras poderá ser uma alternativa de reforço bastante vantajosa, devido ao bom comportamento mecânico, ao seu reduzido custo e aos seus favoráveis benefícios ambientais. Graeff *et al.* [14] realizaram um programa experimental com fibras de aço, comerciais e recicladas, acelerando a corrosão nas fibras através de ciclos de imersão/secagem em solução salina. Durante a cura das vigas com fibras recicladas verificou-se visualmente que algumas fibras à superfície, apresentavam sinais de corrosão e à idade dos ensaios (28 dias) possuíam corrosão superficial mais intensa. Nestas vigas, após a realização dos ensaios de flexão, observou-se na secção de fratura, que os sinais de corrosão ficaram limitados a uma espessura de recobrimento não superior a 10 mm. No caso de vigas com fibras comerciais, os sinais de corrosão limitaram-se às fibras localizadas na superfície.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para os betões convencionais, sem adição de fibras de aço, existem indicadores de durabilidade que são de utilização corrente [7]. No entanto, para betões reforçados com fibras de aço, a bibliografia ainda é escassa e os assuntos relacionados com a durabilidade, nomeadamente com a resistência à corrosão das fibras de aço, estão tratados de uma forma ainda incipiente, suscitando a dúvida se a corrosão das fibras pode, ou não, provocar o destacamento do betão envolvente [7, 13]. Neste seguimento, desenvolveu-se um trabalho experimental com provetes de BACRFA e provetes de BAC sem fibras, com o objetivo de avaliar parâmetros indicadores de durabilidade de utilização corrente em betões convencionais (absorção de água por imersão e por capilaridade, resistividade elétrica, difusão

de cloretos por migração em regime não estacionário, resistência à penetração de cloretos por imersão e resistência à carbonatação).

2.1 Materiais e Composições

Os materiais utilizados para o fabrico das composições de BAC e de BACRFA foram o cimento Portland CEM I 42.5R (C), o Fíler Calcário (FC), três tipos de agregados (areia fina 0.15-1.19 mm (AF), meia areia 0.30-4.76 mm (MA) e uma brita 5-19 mm (B)), água (A), superplastificante ViscoCrete 3005 (SP) e fibras de aço com extremidades dobradas, com comprimento (l_f) de 35 mm, diâmetro (d_f) de 0.50 mm, esbelteza l_f/d_f de 70 e uma resistência à tração de 1300 MPa.

As composições de BAC e de BACRFA adotadas estão apresentadas no Quadro 1, com a dosagem de cada componente por m^3 . As composições foram definidas de modo a garantir as características de auto-compactabilidade requeridas, de acordo com o teor de fibras (C_f) adotado.

Quadro 1. Composições do BAC e do BACRFA (kg/m^3)

	C (kg)	FC (kg)	AF (kg)	MA (kg)	B (kg)	A (L)	SP (L)	C_f (kg)	A/C
BAC	413	353	198	722	648	127.8	7.83	0	0.31
BACRFA	413	353	195	713	640	127.8	7.83	60	0.31

2.2 Procedimentos de ensaio

Com o objetivo de caracterizar os betões sob o ponto de vista da durabilidade, foram avaliados alguns parâmetros indicadores de durabilidade de utilização corrente em betões convencionais, em provetes de BAC e BACRFA aos 28 dias de idade, nomeadamente, a absorção de água por imersão - 3 provetes cúbicos de 100 mm (LNEC E394 [15]) e por capilaridade - 3 provetes cúbicos de 100 mm (LNEC E393 [16]), a resistividade elétrica - 4 provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura (RILEM TC 154-EMC [17]), a difusão de cloretos por migração em regime não estacionário - 3 provetes cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 50 mm de altura (LNEC E463 [18]), a resistência à penetração de cloretos por imersão - 2 provetes cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 100 mm de altura (LNEC E390 [19]) e a carbonatação (FprCEN/TS 12390-12 [20]).

3. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

3.1 Absorção de água por imersão

A Figura 8 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de absorção de água por imersão, que indicam que a porosidade aberta do BACRFA (10.7%) foi 5.6% superior à do BAC (11.3%).

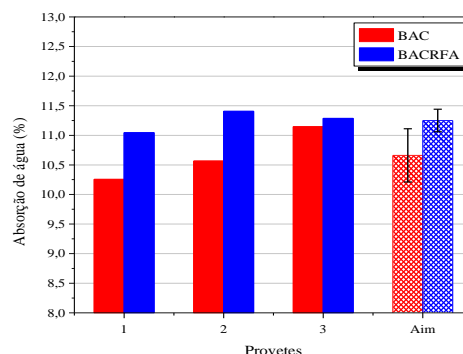


Figura 8. Valores médios da absorção de água por imersão

3.2 Absorção de água por capilaridade

Relativamente à absorção de água por capilaridade, os resultados obtidos e apresentados na Figura 9 demonstram que a quantidade total de água absorvida é maior no BAC, mas o coeficiente de absorção de água por ação da capilaridade do BAC é semelhante ao do BACRFA ($0.1272 \text{ mg/mm}^2/\text{min}^{0.5}$ no BAC e $0.0941 \text{ mg/mm}^2/\text{min}^{0.5}$ no BACRFA).

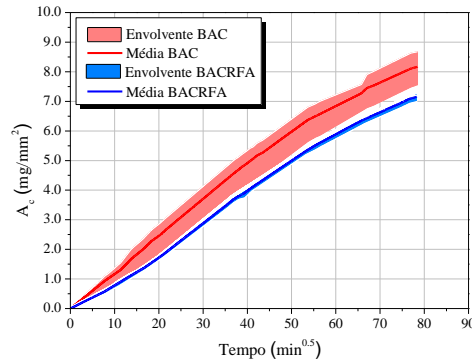


Figura 9. Absorção capilar dos provetes de BAC e de BACRFA

3.3 Resistividade eléctrica

A resistividade eléctrica média, ρ_m , dos provetes ensaiados é apresentada no Quadro 2. A diferença obtida entre o BAC e o BACRFA (redução de 63% no caso do BACRFA) foi devida à elevada condutividade eléctrica das fibras de aço, que diminuiu a resistividade eléctrica do betão. O elevado coeficiente de variação, CoV, obtido no BACRFA aos 7 e 28 dias é justificado pela presença das fibras de aço que influenciam significativamente o campo eléctrico gerado pelo resistivímetro de Wenner.

Quadro 2. Resistividade eléctrica média dos provetes de BAC e de BACRFA

	BAC			BACRFA		
	7 dias	28 dias	90 dias	7 dias	28 dias	90 dias
ρ_m (k Ω .cm)	7.3	10.1	11.4	2.6	3.7	4.5
CoV (%)	2.71	1.64	3.46	22.75	21.47	4.01

3.4 Difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário

A resistência dos betões à penetração dos cloretos, foi avaliada através de ensaios acelerados de migração de cloretos em regime não estacionário, de acordo com a especificação do LNEC E463 [18]. Os valores médios obtidos do coeficiente de difusão de cloretos, D_m , estão apresentados no Quadro 3.

Quadro 3. Coeficientes de difusão de cloretos no BAC e no BACRFA

	BAC	BACRFA
D_m ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	10.27	11.61
CoV (%)	1.49	30.93

No Quadro 3 verifica-se que a resistência à penetração dos cloretos é, aparentemente, a mesma no BAC e no BACRFA, visto que apresentam um coeficiente de difusão semelhante. No entanto, a base de comparação entre BAC e BACRFA poderá não ser tão imediata, uma vez que as fibras de aço poderão levar a que os iões cloreto se fixem preferencialmente nas fibras, impedindo ou retardando a penetração dos mesmos na matriz do betão. Com o decurso do ensaio foi possível observar, a formação crescente de material corroído na solução catódica dos ensaios do BACRFA (Figura 10).



Figura 10. Ensaio acelerado de migração de cloretos

3.5 Resistência à penetração de cloretos por imersão

O ensaio de penetração de cloretos por imersão foi realizado de acordo com a especificação do LNEC E390 [19].

Determinado o perfil do teor de cloretos no betão e com base na 2ª lei de Fick procedeu-se à determinação dos coeficientes médios de difusão aparente, D_m , apresentados no Quadro 4.

Quadro 4. Coeficientes de difusão de cloretos no BAC e no BACRFA

	BAC	BACRFA
D_m ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	11.62	8.21
CoV (%)	3.88	1.66

Analisando os resultados apresentados no Quadro 4 verifica-se que o coeficiente de difusão é mais elevado no BAC (11.62E-12 m²/s) do que no BACRFA (8.21E-12 m²/s), que poderá ser devido ao facto dos iões cloreto se fixarem preferencialmente nas fibras de aço e assim, retardar a penetração dos iões na matriz.

Comparando os valores dos coeficientes de difusão por imersão (Quadro 4) com os de difusão por migração em regime não estacionário (Quadro 3), a tendência é precisamente contrária, visto que se verificou que por imersão, o coeficiente de difusão é mais elevado no betão sem fibras. O método de avaliação por migração, embora seja mais rápido que o baseado na difusão por imersão, apresenta algumas desvantagens, nomeadamente, o resultado é qualitativo (a diferença de potencial aplicada e a duração do ensaio foram definidas em função de um ensaio de migração de um provete de betão convencional com uma dosagem normal de ligante, pelo que, poderá não ser aplicável a BRFA) e provoca um aumento de temperatura no betão por ser imposta uma diferença de potencial elevada. Deste modo, é mais prudente utilizar métodos baseados na difusão por imersão para a avaliação de penetração de cloretos no BACRFA, que embora sejam mais morosos, representam melhor o ambiente de exposição real. Importa também referir que os valores dos coeficientes de difusão obtidos por migração ou por imersão foram bastante reduzidos devido à reduzida permeabilidade e porosidade dos betões auto-compactáveis.

3.6 Carbonatação

Até aos 70 dias de exposição ao CO₂, verificou-se uma linearidade da penetração do CO₂, pelo que, determinando o declive por regressão linear obtiveram-se os coeficientes de carbonatação K_c , 9.74mm.ano^{-0.5} para o BAC e de 9.98 mm.ano^{-0.5} para o BACRFA. A resistência à carbonatação, R_{c65} , foi determinada tal como preconizado na especificação LNEC E465 [21], para o período de exposição de 70 dias. Obtiveram-se os valores R_{c65} de 1774.62 kg.ano/m⁵ para o BAC, cerca de 4.66% superior ao obtido para o BACRFA, no valor de 1695.67 kg.ano/m⁵, o que significa que a adição de fibras de aço ao betão não provocou uma variação significativa da resistência à carbonatação do betão. Tanto para o BAC como para o BACRFA, o CO₂ penetra pouco ao longo do tempo de exposição, devido à elevada qualidade do betão, cuja permeabilidade é reduzida.

CONCLUSÕES

Na opinião geral, a corrosão no BRFA é menos gravosa quando comparada com a corrosão das armaduras ordinárias do betão armado.

A carbonatação provoca corrosão superficial mas não evidencia indícios de causar destacamento do betão envolvente [5]. A difusibilidade de cloretos depende da estrutura porosa do betão e de todos os factores relacionados com a composição do betão e com a presença de fissuras [8, 11, 12].

No betão fendilhado, a corrosão que ocorre nas fibras de aço que atravessam as fissuras, pode conduzir a uma significativa redução da resistência residual em tração e flexão. Por outro lado, os produtos da corrosão das fibras podem causar um aumento da rugosidade das fibras, melhorando o seu comportamento ao arrancamento e, conseqüentemente, a resistência à flexão do BACRFA [8]. Para aberturas de fissura até 0.1 mm, a corrosão das fibras tem um efeito desprezável, visto que o processo de auto-regeneração (*self-healing*) recupera a integridade do BRFA [8]. A taxa de degradação do betão fendilhado devido à corrosão das fibras, depende de vários parâmetros, nomeadamente, da abertura de fissura, das condições de exposição ambiental e do tipo de fibras [11].

A corrosão superficial afeta negativamente a aparência das superfícies de BRFA mas não afeta as suas propriedades mecânicas [14]. Quando a razão A/C é menor ou igual a 0.5, o mínimo recobrimento superficial, para evitar a corrosão das fibras, é de 0.1 mm [8].

A adição de fibras de aço originou um ligeiro aumento da porosidade aberta, no entanto, não provocou uma alteração significativa da absorção de água por capilaridade, o que indica que o tamanho dos poros capilares não foi significativamente alterado.

A presença de fibras de aço reduz a resistividade elétrica do betão devido à elevada condutividade elétrica das fibras de aço, aumentando a possibilidade de corrosão das fibras. A determinação do coeficiente de difusão de cloretos através do ensaio de migração em regime não estacionário pode não ser completamente fiável para o BACRFA, visto que, os iões cloreto podem tender a fixarem-se nas fibras, retardando a penetração dos iões na matriz. A avaliação da penetração de cloretos por imersão é um método mais prudente do que por migração. Devido ao elevado grau de compactação dos betões em estudo, eles apresentam boa e similar resistência à carbonatação.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto de investigação QREN, número 23024, denominado INOTEC, que envolve a empresa CiviTest e o ISISE/Universidade do Minho. O primeiro autor agradece a bolsa de investigação concedida pelo referido projeto. À Maccaferri e Radmix pelo fornecimento das fibras de aço, à Sika pelo superplastificante, à Secil pelo cimento e à Omya Comital pelo Filer calcário.

REFERÊNCIAS

- [1] Balouch, S.; Forth, J.; Granju, J. (2010). Surface Corrosion of Steel fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, pp. 410-414.
- [2] ACI 544.5R-10 (2010). Report on the Physical Properties and Durability of Fiber Reinforced Concrete. ACI Committee 544.
- [3] Shi, X.; Xie, N.; Fortune, K.; Gong, J. (2012). Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview. *Construction and Building Materials*, Vol. 30, pp. 125-138.

- [4] Frazão, C. (2013). Durabilidade de betão auto-compactável reforçado com fibras de aço. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães.
- [5] Corinaldesi, V.; Moriconi, G. (2004). Durable fiber reinforced self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, pp. 249-254.
- [6] RILEM TC 56-MHM (1988). CPC-18 Measurement of hardened concrete carbonation depth. *Materials and Structures*, Vol. 21, pp. 453-455.
- [7] Camões, A., Costeira, A. (2012). Durabilidade de Betões Reforçados com Fibras de Aço. BE2012 - Encontro Nacional Betão Estrutural, 24-26 Outubro 2012, Porto.
- [8] Granju, J.-L.; Balouch, S. (2005). Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks. *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, pp. 573-577.
- [9] Rapoport, J.; Aldea, C.; Shah, S.; Ankenmam, B.; Karr, A. (2002). Permeability of Cracked Steel Fiber - Reinforced Concrete. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp.355-358.
- [10] Mangat, P.; Gurusamy, K. (1987). Chloride Diffusion in Steel Fiber-Reinforced Marine Concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 17, pp. 385-396.
- [11] Nordstrom, E. (2005). Durability of Sprayed Concrete – Steel fibre corrosion in cracks. Tese de doutoramento, Departamento de Engenharia Civil e de Ambiente, Divisão de Engenharia Estrutural, Universidade de Tecnologia de Luleå, Suécia.
- [12] Yoon, I. (2012). Chloride Penetration through Cracks in High- Performance Concrete and Surface Treatment System for Crack Healing. *Hindawi Publishing Corporation, Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2012, Article ID 294571, pp. 8.
- [13] Solgaard, A.; Kuter, A.; Edvardsen, C.; Stang, H.; Geiker, M. (2010). Durability Aspects of Steel Fibre Reinforced Concrete in Civil Infrastructure. *Proc. 2nd International Symposium on Service Life Design for Infrastructure*, 4th – 6th October 2010, Delft, The Netherlands.
- [14] Graeff, A.; Pilakoutas, K.; Lynsdale, C.; Neocleous, K. (2009). Corrosion Durability of Recycled Steel Fibre Reinforced Concrete. Article No.7, *Intersections/Intersec_ii*, Vol. 6, No. 4.
- [15] LNEC E394 (1993). Betões. Determinação da absorção de água por imersão - Ensaio à pressão atmosférica. *LNEC*, Lisboa, pp. 2.
- [16] LNEC E393 (1993). Betões. Determinação da absorção de água por capilaridade. *LNEC*, Lisboa, pp. 2.
- [17] RILEM TC 154-EMC (2004). Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion. *Materials and Structures*, Vol. 37, pp. 623-643.
- [18] LNEC E463 (2004). Determinação do coeficiente de difusão de cloretos por migração em regime não estacionário. *LNEC*, Lisboa, pp. 8.
- [19] LNEC E390 (1993). Betões. Determinação da resistência à penetração de cloretos - Ensaio de imersão. *LNEC*, Lisboa, pp. 2.
- [20] FprCEN/TS 12390-12 (2010). Testing hardened concrete – Part 12: Determination of the potential carbonation resistance of concrete: Accelerated carbonation method. *Technical Specification, European Committee for standardization*, Brussels.
- [21] LNEC E465 (2007). Betões. Metodologia para estimar as propriedades de desempenho do betão que permitem satisfazer a vida útil de projecto de estruturas de betão armado ou pré-esforçado sob as exposições ambientais XC e XS. *LNEC*, Lisboa, pp. 24.