

DURABILIDADE DO BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO



Cristina Frazão

Investigadora
ISISE/UMINHO
Guimarães
frazao_cristina@hotmail.com



Aires Camões

Professor Auxiliar
CTAC/UMINHO
Guimarães
aires@civil.uminho.pt



Joaquim Barros

Professor Catedrático
ISISE/UMINHO
Guimarães
barros@civil.uminho.pt

SUMÁRIO

A durabilidade é uma das características mais importantes que o betão deve possuir devido à sua fundamental incidência na vida útil das estruturas. Para os betões convencionais, sem adição de fibras de aço, existem indicadores de durabilidade que são já de utilização corrente. No entanto, para o betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (BACRFA) a investigação relacionada com a durabilidade ainda é escassa, nomeadamente os aspetos relacionados com a resistência à corrosão das fibras.

Neste seguimento, desenvolveu-se um trabalho experimental com provetes de BACRFA e provetes de betão auto-compactável (BAC) sem fibras, com o objetivo de caracterizar o comportamento mecânico (módulo de elasticidade, resistência à compressão e à flexão) e avaliar parâmetros indicadores de durabilidade (absorção de água por imersão e por capilaridade, permeabilidade ao ar, resistividade elétrica, difusão de cloretos por migração em regime não estacionário e resistência à carbonatação). Os resultados obtidos para os diferentes betões em estudo são apresentados e analisados.

Palavras-chave: Durabilidade, betão auto-compactável reforçado com fibras de aço, corrosão.

1. INTRODUÇÃO

A durabilidade das estruturas de betão tem sido uma preocupação constante no meio técnico da construção, devido ao número crescente de estruturas degradadas prematuramente. Estas devem possuir capacidade de resistência às solicitações provenientes das ações mecânicas, assim como às solicitações derivadas das agressividades físicas, químicas e biológicas a que estão expostas durante a sua vida útil [1].

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 que requer especial atenção pois pode comprometer a durabilidade do betão reforçado com fibras de aço (BRFA). 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 mecanismo de degradação no BACRFA. Deste modo, torna-se necessário avaliar as propriedades de transporte de agentes agressivos para o interior das estruturas de BACRFA, que a longo prazo possam, eventualmente, afetar a sua durabilidade [2,3,4,5,6].

As propriedades de transporte de agentes agressivos, especialmente a permeabilidade, afetam a durabilidade e a integridade do BRFA. A elevada permeabilidade, associada à porosidade, permite a entrada de água, (principal meio de transporte), cloretos e outros agentes agressivos que afetam as fibras, podendo mesmo comprometer a capacidade resistente das estruturas [6,7].

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 fenda 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 fenda e, conseqüentemente, a durabilidade do BRFA pode ser beneficiada.

Para os betões convencionais, sem adição de fibras de aço, existem indicadores de durabilidade que são de utilização corrente [2]. 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 destaca-

mento do betão envolvente [2, 8]. Neste seguimento, desenvolveu-se um trabalho experimental com provetes de BACRFA e provetes de BAC sem fibras, com o objetivo de caracterizar o comportamento mecânico (módulo de elasticidade, resistência à compressão e à flexão) e avaliar parâmetros indicadores de durabilidade (absorção de água por imersão e por capilaridade, permeabilidade ao ar, resistividade elétrica, difusão de cloretos por migração em regime não estacionário e resistência à carbonatação).

2. RESISTÊNCIA À CORROSÃO DO BACRFA

Os processos de corrosão das fibras de aço 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 [4]. Este facto deve-se ao reduzido diâmetro das fibras, cujo volume de óxidos produzido pela corrosão, não é suficiente para induzir uma tensão de tração superior à resistência à tração do betão envolvente, provocando a sua fendilhação.

No betão fendilhado, a corrosão tende a ocorrer nas fibras de aço que atravessam as fendas, provocando a redução da secção das fibras. Esta redução pode afetar negativamente o comportamento mecânico do BRFA, podendo conduzir a uma significativa redução da resistência residual em tração e flexão. Por outro lado, os produtos corrosivos podem causar um aumento do atrito fibra/matriz, melhorando o comportamento de arrancamento da fibra e, conseqüentemente, a resistência à flexão dos elementos de BRFA [3]. Se a abertura de fenda 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 [3].

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 [9].

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. Quando as fibras perdem esta camada de passivação protetora, o processo de corrosão pode iniciar-se, mantendo-se livres de corrosão as fibras localizadas em maior profundidade.

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 fendas [10]. 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 [7].

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. 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 [11]. De acordo com o estudo realizado por Balouch et al. [4], 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.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Materiais e Composições do BAC e do BACRFA

Os materiais utilizados para o fabrico das composições de BAC e de BACRFA foram o cimento Portland CEM I 42.5R (C), o Filer 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 12 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

3.2 Procedimentos de ensaio

Para caracterizar o comportamento do BAC e do BACRFA no estado fresco, de modo a verificar se o betão satisfazia os critérios de auto-compactibilidade, foram realizados alguns ensaios, nomeadamente, o ensaio de espalhamento ("*Slump-flow test*") de acordo com a norma NP EN 12350-8 [12], da caixa L ("*L-Box test*") de acordo com a norma NP EN 12350-10 [13], e ensaios para a determinação do teor de ar e da massa volúmica, de acordo com as normas NP EN 12350-7 [14] e NP EN 12350-6 [15], respetivamente.

O processo de caracterização mecânica do BAC e do BACRFA incluiu o estudo da variação ao longo do tempo (7, 28 e 90 dias) do módulo de elasticidade, da resistência à compressão e do comportamento à flexão. A determinação do módulo de elasticidade e da resistência à compressão foi realizada em 4 provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de

altura, de acordo com a norma NP EN 12390-13 [16] e a norma NP EN 12390-3 [17] respetivamente. O comportamento em flexão foi avaliado em 4 vigas de $150 \times 150 \times 600 \text{ mm}^3$, em conformidade com as recomendações da RILEM TC 162-TDF [18] e do CEB-FIP MODEL CODE [19].

Com o objetivo de caracterizar os betões sob o ponto de vista da durabilidade, foram avaliados alguns 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 [20]) e por capilaridade - 3 provetes cúbicos de 100 mm (LNEC E393 [21]), a permeabilidade ao ar (LNEC E392 [22]) - 4 provetes cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 40 mm de altura, a resistividade elétrica - 4 provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura (RILEM TC 154-EMC [23]), 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 [24]) e a carbonatação (FprCEN/TS 12390-12 [25]).

Dois dias após a sua execução, os provetes foram desmoldados e a sua conservação e cura até aos 28 dias de idade foi realizada por imersão em água à temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$, até imediatamente antes da realização dos ensaios.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 Estado fresco

A trabalhabilidade foi avaliada através dos ensaios de espalhamento e da caixa L. A determinação do teor de ar e da massa volúmica também foi realizada. Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 2.

Quadro 2. Propriedades do BAC e do BACRFA no estado fresco

Betão	Espalhamento		Caixa L			Teor de ar (%)	Densidade (g/cm^3)
	D_{final} (mm)	T_{500} (s)	H_2/H_1	T_{200} (s)	T_{400} (s)		
BAC	673	10.2	0.88	2.5	5.3	0.83	2.38
BACRFA	667	15.6	0.81	5.3	10.1	0.80	2.40

Em relação à trabalhabilidade, analisando os valores obtidos do T_{500} , verifica-se que a adição de fibras de aço ao BAC provoca uma redução da condição de auto-compactabilidade do betão. No entanto, esta não se revelou significativa, visto que, ambas as composições apresentaram resultados semelhantes do diâmetro de espalhamento e do parâmetro H_2/H_1 . A adição de fibras de aço não afetou significativamente o teor de ar e a massa volúmica do betão auto-compactável no estado fresco.

4.2 Estado endurecido

4.2.1 Propriedades mecânicas

4.2.1.1 Comportamento à Compressão

O módulo de elasticidade e a resistência à compressão de cada provete foram avaliados aos 7, 28 e 90 dias de idade. O procedimento adotado consistiu em determinar a resistência à compressão em um provete, a cada idade, de modo a estabelecer o valor máximo da força de compressão nos ciclos de carga/descarga, realizados para determinar o módulo de elasticidade (Figura 1).



Figura 1. Ensaio de determinação do módulo de elasticidade

Para os restantes três provetes, determinou-se primeiro o módulo de elasticidade e de seguida, procedeu-se ao carregamento dos provetes até à rotura para obter a relação tensão-extensão em compressão (Figura 2).



Figura 2. Ensaio de determinação da resposta tensão-extensão em compressão

Na Figura 3 apresentam-se as curvas médias tensão-extensão em compressão, obtidas para o BAC e o BACRFA, aos 7, 28 e 90 dias de idade. Os valores médios do módulo de elas-

tidade, E_{cm} , e da resistência à compressão, f_{cm} , para as diferentes idades, apresentam-se no Quadro 3, com os correspondentes coeficientes de variação, CoV.

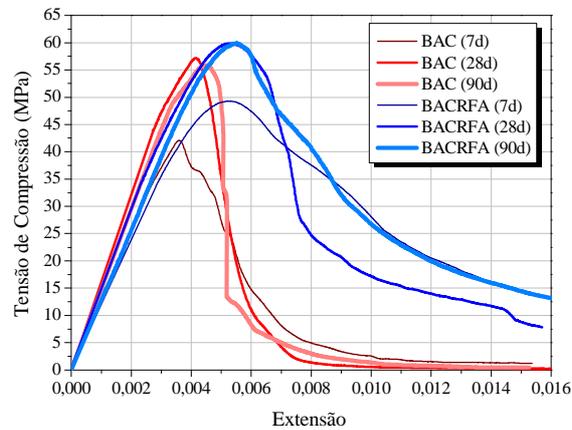


Figura 3. Relação média da tensão - extensão em compressão de quatro respostas obtidas do BAC e do BACRFA, aos 7, 28 e 90 dias de idade

Quadro 3. Resultados obtidos nos ensaios de compressão

	BAC			BACRFA		
	7 dias	28 dias	90 dias	7 dias	28 dias	90 dias
E_{cm} (MPa)	31.16	35.79	36.65	31.58	36.88	37.80
CoV (%)	8.62	1.16	6.96	7.62	6.71	6.38
f_{cm} (MPa)	43.23	60.28	63.85	50.17	61.90	66.13
CoV (%)	8.29	1.27	2.05	6.92	6.34	9.99

A adição de fibras de aço ao BAC provocou um aumento pouco significativo (não ultrapassando 3%) do módulo de elasticidade, como seria expectável, dada a percentagem reduzida de fibras na composição. A resistência à compressão também aumentou ligeiramente com a adição de fibras (16% aos 7 dias, 3% aos 28 dias e 4% aos 90 dias). A resposta tensão-extensão de compressão evidenciou que as fibras permitem aumentos significativos na resistência pós pico, resultando um aumento apreciável na capacidade de absorção de energia de deformação axial por compressão.

4.2.1.2 Comportamento à Flexão

O comportamento em flexão foi avaliado através de ensaios de flexão realizados em conformidade com as recomendações da RILEM TC 162-TDF [18] e do CEB-FIP MODEL CODE [19]. Os ensaios foram realizados sob controlo de deslocamento através de um transdutor (LVDT) posicionado a meio vão, com uma velocidade de deformação de 0.2 mm/min (Figura 4).



Figura 4. Ensaio de avaliação do comportamento à flexão

Na Figura 5 apresentam-se as curvas médias força-flecha registadas no BAC e no BACRFA às três idades consideradas.

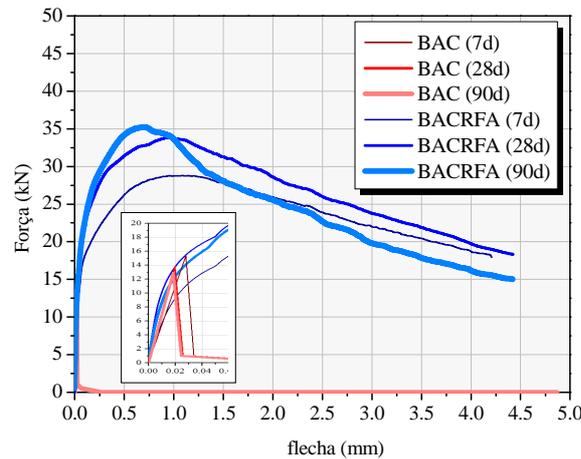


Figura 5. Relação força - flecha do BAC e do BACRFA

No Quadro 4 são apresentados os valores médios e os respetivos coeficientes de variação da resistência à tração por flexão, $f_{ctm,fl}$, e a energia absorvida para uma deformação de 4 mm, G_{fm} , que corresponde à área sob a curva força-flecha até ao valor de deformação indicado. Pelos resultados obtidos, verificou-se que as fibras proporcionam ao betão um aumento muito significativo da resistência à flexão e da energia absorvida.

Quadro 4. Resultados obtidos da resistência à tração por flexão e da energia dissipada

	BAC			BACRFA		
	7 dias	28 dias	90 dias	7 dias	28 dias	90 dias
$f_{ctm,fl}$ (MPa)	4.90	4.83	4.67	9.44	10.92	11.73
CoV(%)	5.19	7.54	9.15	19.39	13.76	15.84
G_{fm} (N/m)	211.46	209.35	183.49	6248.32	7245.16	6678.39
CoV(%)	21.97	7.80	10.23	33.34	9.32	12.99

Com base nas recomendações da RILEM TC 162 TDF [18], e considerando as curvas força-flecha obtidas nos ensaios, foram calculadas as resistências equivalentes (f_{eq2} e f_{eq3}) e residuais (f_{R1} e f_{R4}). Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 5.

Quadro 5. Resultados obtidos nos ensaios de flexão

	F_L (kN)	$f_{ct,L}$ (MPa)	$f_{eq,2}$ (MPa)	$f_{eq,3}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)
Média (7d)	15.92	5.09	8.34	8.51	8.25	7.09
CoV(%)	5.27	5.26	20.28	19.41	19.00	27.29
Média (28d)	19.97	6.39	10.12	9.72	9.92	7.63
CoV(%)	7.58	7.58	19.73	15.25	19.37	13.03
Média (90d)	21.90	7.01	10.11	7.94	9.82	7.55
CoV(%)	5.75	5.75	4.50	12.85	3.62	4.97

$F_{ct,L}$ - Limite de Proporcionalidade

Os resultados apresentados no Quadro 6, evidenciaram que ambas as resistências f_{eq} e f_R aumentam até aos 28 dias, e aos 90 dias sofreram uma ligeira diminuição, especialmente para grandes deformações/aberturas de fenda, o que significa que devido à elevada resistência da matriz, ocorreu a rotura de algumas fibras de aço.

4.2.2 Indicadores de Durabilidade

4.2.2.1. Absorção de água por imersão

A Figura 6 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de absorção de água por imersão, que indicam que a porosidade aberta do BACRFA foi ligeiramente superior à do BAC. A porosidade média do BAC foi de 10.7% e a do BACRFA foi de 11.3%, 5.6% superior. A maior porosidade aberta, obtida no BACRFA, poderá ser justificada pelo distúrbio que as fibras de aço provocam na microestrutura da matriz do betão, devido à interação fibra-matriz, causando um aumento do índice de vazios.

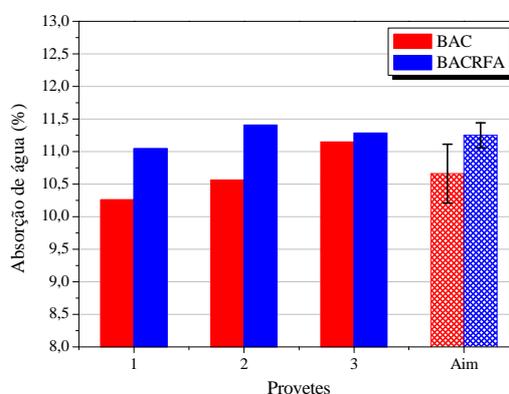


Figura 6. Valores médios da absorção de água por imersão

4.2.2.2. Absorção de água por capilaridade

Relativamente à absorção de água por capilaridade, os resultados obtidos e apresentados nas Figuras 7 e 8 demonstram que a quantidade total de água absorvida é maior no BAC, sendo o coeficiente de absorção de água por ação da capilaridade do BAC superior 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). A adição de fibras de aço provocou uma diminuição da absorção de água por capilaridade, o que poderá indicar que as fibras interrompem os poros capilares, diminuindo a tensão superficial existente em cada poro.

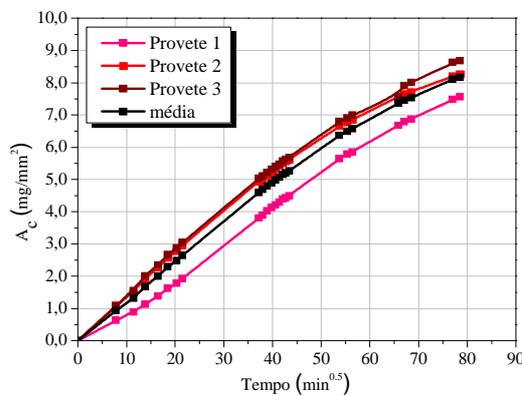


Figura 7. Absorção capilar dos provetes de BAC

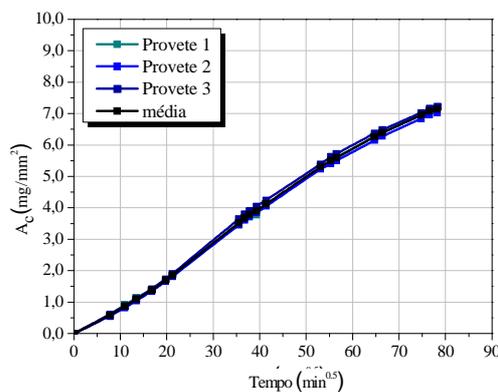


Figura 8. Absorção capilar dos provetes de BACRFA

4.2.2.3. Permeabilidade ao ar

Para a determinação da permeabilidade ao ar foi utilizada a célula de permeabilidade de Leeds. Este permeâmetro permite submeter provetes a uma determinada pressão durante um determinado período, garantindo que o fluxo do fluido que atravessa o provete é estável e uniaxial. A Figura 9 apresenta os resultados obtidos dos coeficientes de permeabilidade ao

ar para os provetes ensaiados. Os valores médios obtidos destes coeficientes foram de $0.483 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ para o BAC e de $0.443 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ para o BACRFA. Estes resultados podem ser considerados semelhantes, visto que a variação de 8.3% entre eles, é da ordem de grandeza do erro do ensaio, que normalmente possui uma elevada dispersão.

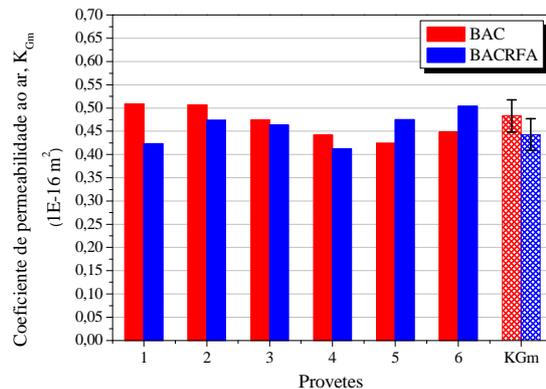


Figura 9. Coeficiente de permeabilidade ao ar nos provetes de BAC e BACRFA

4.2.2.4. Resistividade elétrica

A resistividade elétrica média, ρ_m , dos provetes ensaiados é apresentada no Quadro 6. A diferença obtida entre o BAC e o BACRFA (redução de 63% no caso do BACRFA) foi devida à elevada condutividade elétrica das fibras de aço, que diminuiu a resistividade elétrica 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 elétrico gerado pelo resistímetro de Wenner.

Quadro 6. Resistividade elétrica média dos provetes de BAC e de BACRFA

	BAC			BACRFA		
	7 dias	28 dias	90 dias	7dias	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

4.2.2.5. Difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário

De modo a ser possível avaliar a resistência dos betões à penetração dos cloretos, foram realizados ensaios acelerados de migração de cloretos em regime não estacionário, de acordo com a especificação do LNEC E463 [24] (Figura 10). Os valores médios obtidos do coeficiente de difusão de cloretos por migração, D_m , estão apresentados no Quadro 7.

Quadro 7. Coeficientes de difusão de cloretos no BAC e no BACRFA

	BAC	BACRFA
D_m ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	11.97	11.91
CoV (%)	11.27	32.09



Figura 10. Ensaio acelerado de migração de cloretos

No Quadro 8 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).

4.2.2.6. Carbonatação

A Figura 11 apresenta a profundidade de carbonatação média (mm²) medida no BAC e no BACRFA, ao longo do período de exposição ao CO₂. Até aos 70 dias de exposição, verificou-se uma linearidade da penetração do CO₂, pelo que, determinando o declive por regressão linear obtiveram-se os coeficientes de carbonatação K_c , 9.74 mm.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 [26], 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.

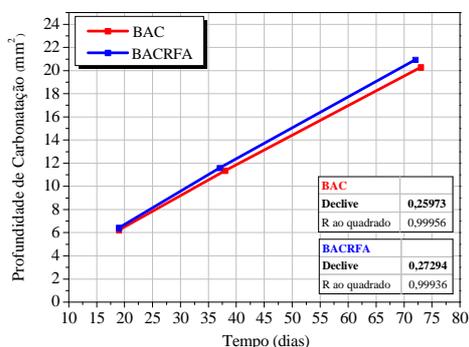


Figura 11. Profundidade de carbonatação ao longo do tempo de exposição

5. CORROSÃO DAS FIBRAS DE AÇO

Na sequência do estudo do efeito da corrosão das fibras de aço, e com o objetivo de verificar se esta pode, ou não, provocar micro-fendilhação e micro-*spalling* do betão envolvente, foram realizados ensaios de migração de cloretos, de modo a induzir intensa corrosão nas fibras de aço, baseados na especificação LNEC E463 [24]. Deste modo, foram colocados 3 provetes de BACRFA, submetidos a uma diferença de potencial de 30V e outros 3 provetes de BACRFA submetidos a 45V, ambos durante 72 horas (condições de agressividade extremas). Observou-se, novamente, que com o decorrer dos ensaios, as fibras de aço apresentaram sinais crescentes de corrosão e conseqüente degradação (Figura 12).

Após 72 horas de exposição, os provetes de BACRFA apresentavam corrosão superficial muito acentuada, com mais intensidade em função da crescente agressividade do meio ambiente (Figura 13). A secção transversal das fibras diminuiu ao longo do comprimento de penetração de iões cloreto e verificou-se o aparecimento de macro-fendilhação na superfície exterior dos provetes (Figura 14). Esta macro-fendilhação deverá ter sido causada pelo aumento do volume das fibras associado ao efeito que a corrosão provoca no aço, visto que a formação de óxidos de ferro envolve um aumento do volume das fibras.

Após o período de exposição, de modo a avaliar o efeito da corrosão das fibras na capacidade resistente do BACRFA, foi determinada a resistência à tração por compressão diametral dos provetes, de acordo com as indicações da norma NP EN 12390-6 [27].



Figura 12. Observação da formação de resíduos provenientes da corrosão das fibras de aço antes (esquerda) e depois (direita) do ensaio



Figura 13. Provetes de BACRFA com e sem exposição à migração de cloretos



Figura 14. Corrosão superficial e macro-fendilhação observada nos provetes ensaiados (face superior exposta à solução anódica)

Os resultados de três ensaios de resistência a tração por compressão diametral, f_{ct} , encontram-se apresentados no Quadro 8.

Quadro 8. Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral

	BACRFA (S/Corrosão)	BACRFA (30V – 72h)	BACRFA (45V – 72h)
f_{ct} (MPa)	5.59	5.67	3.13
CoV (%)	16.71	15.81	9.12

Os resultados apresentados no Quadro 8 indicam que a resistência à tração por compressão diametral do BACRFA não foi significativamente afetada pela corrosão das fibras, quando estas estavam parcialmente corroídas (30V). No entanto, quando as fibras estavam severamente corroídas (45V), o modo predominante de rotura foi o rompimento da fibra, e a corrosão das fibras causou fendilhação, com uma consequente redução de 44% da resistência à tração por compressão diametral, em comparação com o betão sem ação da corrosão.

Estes ensaios, realizados em condições de extrema agressividade, permitiram evidenciar que a corrosão das fibras de aço pode induzir a formação de macro-fendilhação no betão envolvente e o consequente *micro-spalling*.

Analisando a variação da massa dos provetes antes e após os ensaios, foi possível observar um aumento em massa de 0.80% quando os provetes foram submetidos a 30V, e um aumento em massa de 1.51% quando os provetes foram submetidos a 45V.

Importa ainda salientar que os resultados obtidos foram para condições de extrema agressividade que não são esperadas em condições ambientais normais.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos dos indicadores de durabilidade, poderão ser feitas as seguintes observações:

- A adição de fibras de aço originou um ligeiro aumento da porosidade aberta;
- A adição de fibras de aço 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 permeabilidade ao ar do betão não foi substancialmente afetada com a introdução de fibras de aço, apesar de se ter observado uma ligeira diminuição no BACRFA;
- A presença de fibras de aço reduz a resistividade elétrica do betão;
- A determinação do coeficiente de difusão através do ensaio de migração de cloretos em regime não estacionário pode não ser completamente fiável para o BACRFA, visto que a metodologia utilizada pode causar uma significativa corrosão das fibras de aço e os iões cloreto podem tender a fixarem-se nas fibras de aço. Contudo, os resultados obtidos em ambos os betões foram semelhantes;
- Devido ao elevado grau de compactação dos betões em estudo, eles apresentam boa e similar resistência à carbonatação;
- O estudo permite ainda concluir que em condições de extrema agressividade ambiental, a corrosão das fibras de aço pode originar fendilhação no betão e uma diminuição significativa da sua resistência à tração.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto de investigação QREN, número 5387, denominado LEGOUSE, que envolve as empresas Mota-Engil, CiviTest, ISE/Universidade do Minho e o PIEP. 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 Fíler calcário.

REFERÊNCIAS

- [1] Álvarez, A. – “Durabilidad del hormigón con fibras de acero”, Minor thesis, 2009, Departamento de Engenharia de Construção, Universidade Politécnica da Catalunha, Barcelona, Espanha;
- [2] Camões, A., Costeira, A. – “Durabilidade de Betões Reforçados com Fibras de Aço”, BE2012 – Encontro Nacional Betão Estrutural, 24-26 Outubro 2012, Porto;
- [3] Granju, J.L.; Balouch, S. – “Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks”, *Cement and Concrete Research*, 2005, vol 35, pp. 573–577;
- [4] Balouch, S.; Forth, J.; Granju, J. – “Surface Corrosion of Steel fibre reinforced concrete”, *Cement and Concrete Research*, 2010, vol 40, pp. 410–414;

- [5] Corinaldesi, V.; Moriconi, G. – “Durable fiber reinforced self-compacting concrete”, *Cement and Concrete Research*, 2004, V.34, pp. 249-254;
- [6] Rapoport, J.; Aldea, C.; Shah, S.; Ankenmam, B.; Karr, A. – “Permeability of Cracked Steel Fiber – Reinforced Concrete”, *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, 2002, V.14, No.4, pp. 355-358, American Society of Civil Engineers, Washington DC.;
- [7] Costeira, A. – “Durabilidade de betão reforçado com fibras de aço”, *Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil*, 2011, Universidade do Minho, Guimarães;
- [8] Solgaard, A.; Kuter, A.; Edvardsen, C.; Stang, H.; Geiker, M. – “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;
- [9] ACI 544.5R-10 – “Report on the Physical Properties and Durability of Fiber Reinforced Concrete”, *ACI Committee 544*, 2010;
- [10] Shi, X.; Xie, N.; Fortune, K.; Gong, J. (2012) – “Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview”, *Construction and Building Materials*, 2012, V.30, pp.125-138;
- [11] Graeff, A.; Pilakoutas, K.; Lynsdale, C.; Neocleous, K. – “Corrosion Durability of Recycled Steel Fibre Reinforced Concrete”, 2009, Article No.7, *Intersections/Intersec_ii*, V.6, No.4;
- [12] NP EN 12350-8 – “Ensaio do Betão fresco, Parte 8: Auto-Compactável - Ensaio do diâmetro de espalhamento”, IPQ, 2010, Lisboa;
- [13] NP EN 12350-10 – “Betão do betão fresco, Parte 10: Auto-Compactável - Ensaio da Caixa L”, IPQ, 2010, Lisboa;
- [14] NP EN 12350-7 – “Ensaio do Betão fresco, Parte 7: Determinação do teor de ar”, Métodos pressiométricos, IPQ, Lisboa, 2009, pp. 26;
- [15] NP EN 12350-6 – “Ensaio do betão fresco, Parte 6: Densidade”, IPQ, 2002, Lisboa, 2002, pp. 13;
- [16] NP EN 12390-13 – “Ensaio do betão endurecido – Parte 13: Determinação do módulo de elasticidade à compressão”, IPQ, 2014, Lisboa;
- [17] NP EN 12390-3 – “Ensaio do betão endurecido, Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio”, IPQ, 2011, Lisboa, pp. 21;
- [18] RILEM TC 162-TDF – “Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. σ - ϵ design method. Final Recommendation”, *Materials and Structures*, V. 36, 2003, pp. 560-567;
- [19] CEB FIB Model Code, V.1, 2010, pp. 350;

- [20] LNEC E394 – “Betões. Determinação da absorção de água por imersão - Ensaio à pressão atmosférica”, *LNEC*, 1993, Lisboa, pp. 2;
- [21] LNEC E393 – “Betões. Determinação da absorção de água por capilaridade”, *LNEC*, 1993, Lisboa, pp. 2;
- [22] LNEC E392 – “Determinação da permeabilidade ao oxigénio”, *LNEC*, 1993, Lisboa, pp.2;
- [23] RILEM TC 56-MHM – “CPC-18 Measurement of hardened concrete carbonation depth”, *Materials and Structures*, V.21, 1988, pp. 453-455;
- [24] LNEC E463 – “Determinação do coeficiente de difusão de cloretos por migração em regime não estacionário”, *LNEC*, 2004, Lisboa, pp. 8;
- [25] FprCEN/TS 12390-12 – “Testing hardened concrete – Part 12: Determination of the potential carbonation resistance of concrete: Accelerated carbonation method”, Technical Specification, European Committee for standardization, 2010, Brussels;
- [26] LNEC E465 – “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*, 2007, Lisboa, pp. 24;
- [27] NP EN 12390-6 – “Ensaio do betão endurecido, Parte 6: Resistência à tracção por compressão de provetes”, *IPQ*, 2003, Lisboa, pp. 14;