

Influência do efeito de exposições ambientais no comportamento pós-fissurado de um BAC reforçado com fibras de aço

Gonçalo
Escusa¹

Vítor M.C.F.
Cunha²

José Sena-
Cruz³

David
Nascimento⁴

Eduardo N.B.
Pereira⁵

RESUMO

Neste trabalho apresentam-se os principais resultados do estudo da influência de certo tipo de exposições ambientais no comportamento pós-fissurado de betão auto-compactável reforçado com fibras de aço, BACRFA. Para o devido efeito foram produzidos diversos provetes prismáticos de BACRFA. Inicialmente os provetes foram sujeitos a ensaios cíclicos de flexão em três pontos, com o objetivo de se induzir dois níveis de pré-fissuração distintos, respetivamente, com uma abertura de fenda de 0.3 e 1.0 mm. Posteriormente, os provetes pré-fissurados foram submetidos a três tipos de exposição ambiental durante um período de dezoito meses. Por fim caracterizou-se o desempenho mecânico dos provetes após exposição ambiental.

Palavras-chave: Betão auto-compactável, fibras de aço, ações ambientais, durabilidade.

1. INTRODUÇÃO

A introdução de fibras de aço em matrizes de base cimentícia surgiu por volta da década de 60, trazendo novos benefícios sobretudo no que respeita ao comportamento mecânico pós-fissurado do betão reforçado com fibras de aço (BRFA) [1]. Este material híbrido, quando reforçado com um baixo teor de fibras, distribuídas aleatoriamente, conduz a um aumento das resistências residuais no regime pós-fissurado, da tenacidade, da ductilidade e da resistência ao corte, promovendo um melhor controlo da abertura de fissura [2, 3], garantido pelos mecanismos de aderência entre fibra / matriz [4].

O betão auto-compactável (BAC) surgiu nos finais da década de 80, no Japão, de modo a garantir os requisitos de durabilidade exigidos nas construções de betão armado da época, levando ao desenvolvimento de um novo material que dispensasse a compactação tradicional e evitasse a segregação [5]. O betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (BACRFA) é uma tecnologia

¹ Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal. g.escusa@civil.uminho.pt

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

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

⁴ Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Departamento de Engenharias, Vila Real, Portugal.

david_rodrigues89@hotmail.com

⁵ ISISE, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal. eduardo.pereira@civil.uminho.pt

que combina a elevada fluidez do BAC, facilitando o processo de betonagem, com os benefícios mecânicos introduzidos pelo reforço com fibras de aço.

Sendo o BACRFA uma tecnologia ainda relativamente recente, o estudo do seu comportamento enquanto no estado pós-fissurado e sob o efeito de diferentes ações ambientais encontra-se ainda pouco desenvolvido, tornando premente a necessidade de se aprofundar o conhecimento neste âmbito. Nas últimas três décadas realizaram-se alguns estudos relacionados com a durabilidade do BACRFA, salientam-se alguns exemplos como: Corinaldesi e Moriconi [6] sobre a retração, o efeito dos ciclos de gelo e degelo e penetração de cloretos em BAC; Bassuoni e Nehdi [7] acerca da durabilidade do BAC sujeito a ataques de degradação química acelerada; Lau e Anson [8] sobre o efeito de altas temperaturas em BRFA; Frazão *et al.* [9] sobre a durabilidade do BRFA; entre outros.

Neste trabalho são apresentados e discutidos os resultados de uma campanha experimental com 36 provetes prismáticos BACRFA. Numa primeira fase os provetes foram pré-fissurados até um “*Crack Mouth Opening Displacement*” (CMOD) de 0.3 e 1.0 mm, de forma a simularem-se aproximadamente condições de serviço e de estado limite último, respetivamente. Posteriormente, estes provetes foram expostos a 3 condições ambientais distintas, durante o período de dezoito meses, nomeadamente: i) submersos em água potável; ii) submersos numa solução aquosa de Cloreto de Sódio (NaCl) com uma concentração de 3%; iii) sujeitos a ciclos de molhagem/secagem numa solução de 3% de NaCl (cada ciclo com duração de 12 horas). Finalmente, após a exposição ambiental, todos os provetes foram novamente submetidos a ensaios de flexão em três pontos, de forma a avaliar a influência de cada tipo de exposição no comportamento mecânico pós-fissurado do BACRFA.

2. COMPOSIÇÃO DO BETÃO E PROVETES

O Quadro 1 apresenta os constituintes e respetivas quantidades utilizados na mistura de BACRFA por metro cúbico. A betonagem foi efetuada numa empresa de pré-fabricação com recurso a central de betão automatizada. O procedimento de mistura consistiu na seguinte sequência de passos: (i) introdução dos agregados na misturadora por ordem granulometria decrescente; (ii) adição de cimento Portland, seguindo-se o filler cálcario; (iii) colocação de 80% do volume de água necessária para a amassadura, adição do superplastificante e restantes 20% de água; (iv) introdução das fibras manualmente na mistura. A fluidez do betão foi aferida pelo ensaio de espalhamento com o cone de Abrams na posição invertida [10]. Obteve-se de forma consistente um espalhamento superior a 650 mm.

Quadro 1. Composição do BACRFA utilizado (por m³).

<i>Cimento</i> 42,5R [kg]	<i>Água</i> [kg]	<i>Superplastificante</i> Sika 3005 [kg]	<i>Filler</i> Calcário [kg]	<i>Areia</i> <i> fina</i> [kg]	<i>Areia</i> <i> média</i> [kg]	<i>Areia</i> <i> Grossa</i> [kg]	<i>Fibras</i> [kg]
413.00	140.00	7.83	353.00	237.00	710.00	590.00	60.00

O tipo de fibras utilizado designa-se por Dramix RC-65/35-CN, consistindo em fibras discretas de aço galvanizado, com um comprimento (*lf*) de 35 mm e um diâmetro (*df*) de 0.55 mm. O fator de forma (*lf/df*) é aproximadamente de 64. A resistência à tração uniaxial das fibras é de 1345 MPa. A Fig. 1 apresenta um conjunto de fibras coladas em pente, utilizadas na presente composição de BACRFA.

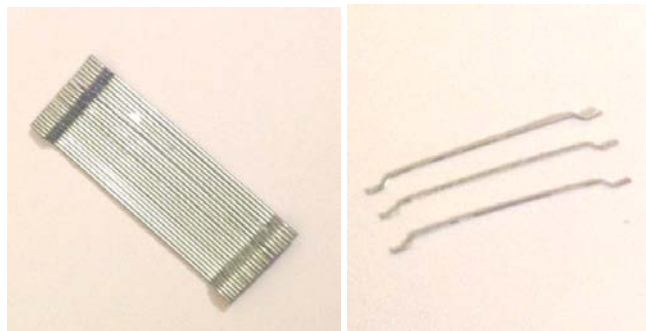


Figura 1. Conjunto de fibras utilizado.

No total betonaram-se 36 provetes prismáticos e 4 provetes cilíndricos, estes últimos para efetuar ensaios de compressão uniaxial. Os provetes prismáticos executados possuem dimensões de 150×150×600 (mm³), tal como recomendado pelas normas EN 14651 [11] e RILEM TC 162-TDF [12]. A betonagem foi realizada com recurso a um balde de descarga suspenso numa ponte rolante, não sendo possível seguir a recomendação proposta em [12] que estipula a ordem do processo de betonagem sobre os moldes, dada a elevada fluidez da mistura. A vibração dos provetes também é desnecessária, por se tratar de um BAC.

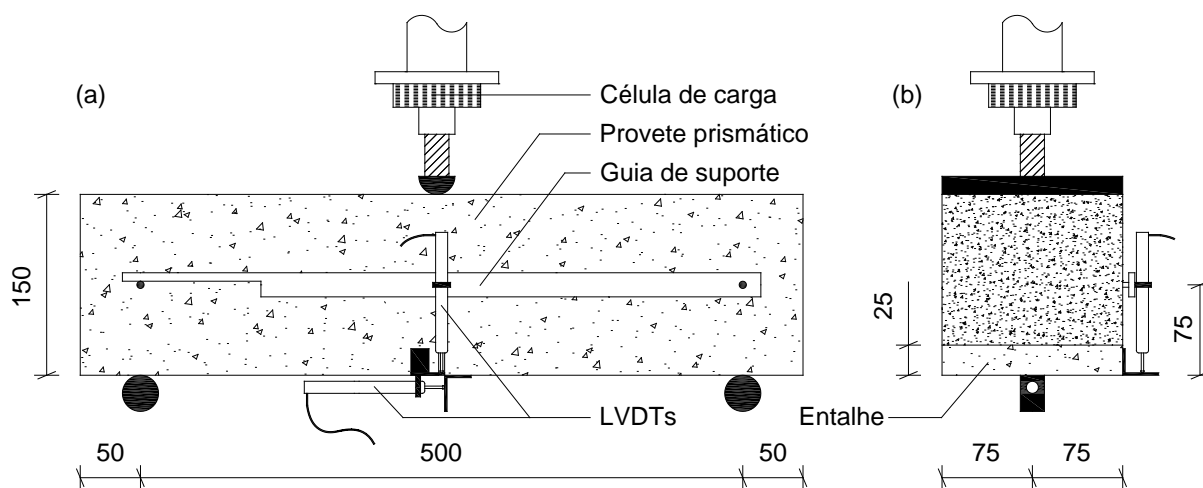
A resistência média à compressão do betão (f_{cm}) obtida aos 28 dias foi de 65.59 MPa com um coeficiente de variação de 3.2%.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Ensaios monotónicos de flexão em 3 pontos

Os ensaios monotónicos de flexão em 3 pontos permitiram caracterizar o comportamento em flexão dos provetes prismáticos, nomeadamente, determinar as tensões residuais e equivalentes em flexão, de acordo com as recomendações [11, 12]. Os provetes foram preparados seguindo as recomendações da mesma norma, à exceção do procedimento de betonagem nos moldes. Após a cura dos provetes em câmara climática a 20°C e 60% HR, realizou-se um entalhe numa das faces paralela à direção de betonagem, com uma profundidade de 25 mm e uma espessura de 5 mm.

Os ensaios foram efetuados num equipamento hidráulico servo-controlado, com capacidade para 200 kN. Utilizou-se uma célula de carga de 100 kN com uma precisão de 0.1 kN. Os ensaios foram realizados em controlo de deslocamento, impondo-se um incremento de deslocamento constante de 0.2 mm/min a meio vão do provete prismático. Instalaram-se dois transdutores de deslocamento, com uma gama de medida de 10 mm, para a medição do deslocamento a meio vão e do “*Crack Mouth Opening Displacement*” (CMOD), respetivamente. A Fig. 2 ilustra a configuração adotada nos ensaios



realizados.

Figura 2. Esquema do ensaio à flexão em 3 pontos: (a) Vista de perfil; (b) Vista em corte. Nota: cotas em [mm].

3.2 Ensaios cíclicos de flexão em 3 pontos

A pré-fissuração dos provetes foi efetuada por intermédio de ensaios cíclicos. Os provetes foram submetidos a 8 ciclos de carga e descarga, tendo-se efetuado o ciclo de carga até um CMOD de 0.3 e 1.0 mm em cada caso. Para os ensaios cíclicos com um CMOD de 0.3 mm, durante um ciclo de carga e descarga, a abertura de fissura variava entre 0.2 e 0.3 mm. Nos ensaios cíclicos com um CMOD de 1.0 mm, durante um ciclo de carga e descarga, a abertura de fissura varia entre 0.8 e 1.0 mm. Foi utilizada a mesma configuração dos ensaios monotónicos, descritos no ponto 3.1.

No total pré fissuraram-se dois conjuntos de 32 provetes, com aberturas de fenda máximas de 0.3 mm e 1 mm.

3.3 Ensaio de durabilidade

Para os ensaios de durabilidade, dividiram-se os provetes prismáticos em 3 séries correspondentes a três exposições ambientais distintas, com 8 provetes cada. Em cada uma destas séries constituíram-se duas subséries, sujeitando-se os provetes a uma abertura de fenda máxima de 0.3 mm na primeira e de 1.0 mm na segunda. A primeira série consistiu em submergir os provetes em água potável. A segunda série consistiu em submergir os provetes numa solução aquosa de cloreto de sódio (NaCl), com uma concentração de 3%. Por fim a terceira série consistiu em submeter os provetes a ciclos de molhagem e secagem, em que na fase molhada, os provetes estavam submersos numa solução de NaCl, com uma concentração de 3%, e na fase seca os provetes estavam expostos a temperaturas que rondavam os 32°C. Estes ciclos repetiram-se de 12 em 12 horas.

Todos os provetes estiveram sujeitos às respetivas exposições ambientais durante 18 meses. No final do referido período foram realizados os ensaios de flexão em 3 pontos descritos no ponto 3.1. No final de cada ensaio de flexão foi projetada numa das superfícies de fratura do provete uma solução alcoólica de fenolftaleína, que permitiu observar a penetração de cloretos, e na face oposta uma solução aquosa de nitrato de prata, que permitiu observar a evolução da carbonatação do betão. Ambas as soluções foram aplicadas por pulverização sobre a superfície de fratura.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 Relação tensão em flexão vs. CMOD

Na Fig. 3 ilustram-se as respostas tensão em flexão *versus* CMOD obtidas para os provetes de referência, a curva média e a envolvente de resultados experimentais, sendo esta série designada de 'Ref'. Esta série foi ensaiada aos 28 dias de idade do BACRFA, seguindo o procedimento descrito no ponto 3.1. Por questões técnicas, não se puderam ensaiar aos 18 meses (posteriormente à realização dos ensaios de durabilidade) os restantes 8 provetes de referência (previamente fissurados com uma abertura de fenda de 0.3 e 1.0 mm). Por este motivo, não serão apresentados neste documento os resultados comparativos de betões com a mesma maturidade.

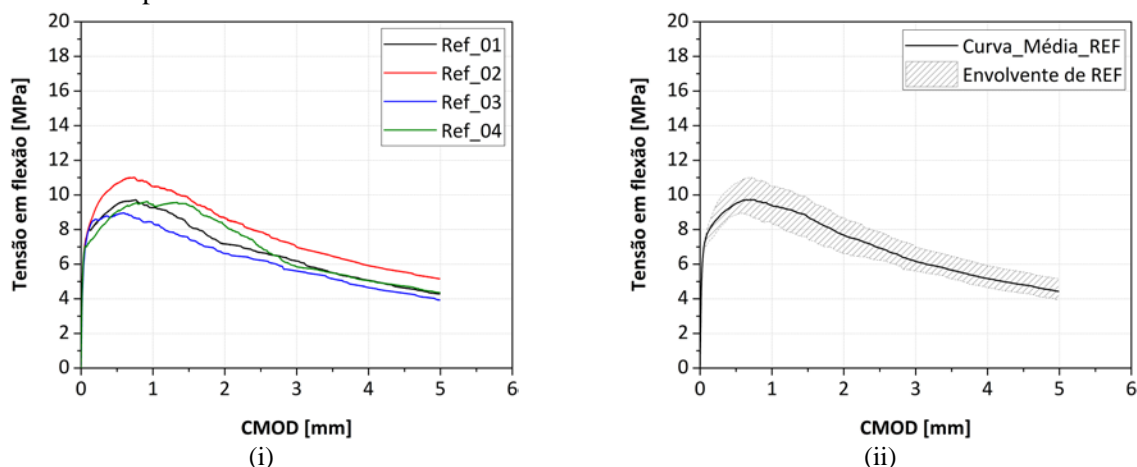


Figura 3 – Provetes de referência ensaiados aos 28 dias: i) respostas tensão em flexão vs. CMOD; ii) curva média e envolvente de resultados experimentais. .

As curvas tensão em flexão *versus* CMOD da série de referência apresentam pouca dispersão de resultados e a tensão máxima em flexão obtida é da ordem dos 10 MPa. Na Fig. 3 pode observar-se que o BACRFA apresenta um comportamento em flexão característico de uma matriz moderadamente reforçada, identificando-se as seguintes regiões: (i) ramo linear-elástico aproximadamente até aos 6 MPa; (ii) endurecimento em flexão após a localização da macro-fissura até sensivelmente 10 MPa; (iii) fase de amolecimento gradual correspondente ao processo de arranque das fibras que intersectam a superfície de fratura. Na Fig. 4 apresenta-se a resposta de 32 provetes submetidos a ensaios de flexão cíclicos, de acordo com o procedimento descrito no ponto 3.2. A nomenclatura adotada para cada uma das séries foi: TW para os provetes submersos em água, sem qualquer adição de sais; WS para os

provetes submersos numa solução de NaCl, com concentração de 3%; WD para os provetes sujeitos a ciclos de molhagem e secagem com uma solução de 3% NaCl. As Figs. 5 a 7 incluem as relações tensão em flexão *versus* CMOD obtidas a partir dos ensaios de flexão, após respetiva exposição ambiental.

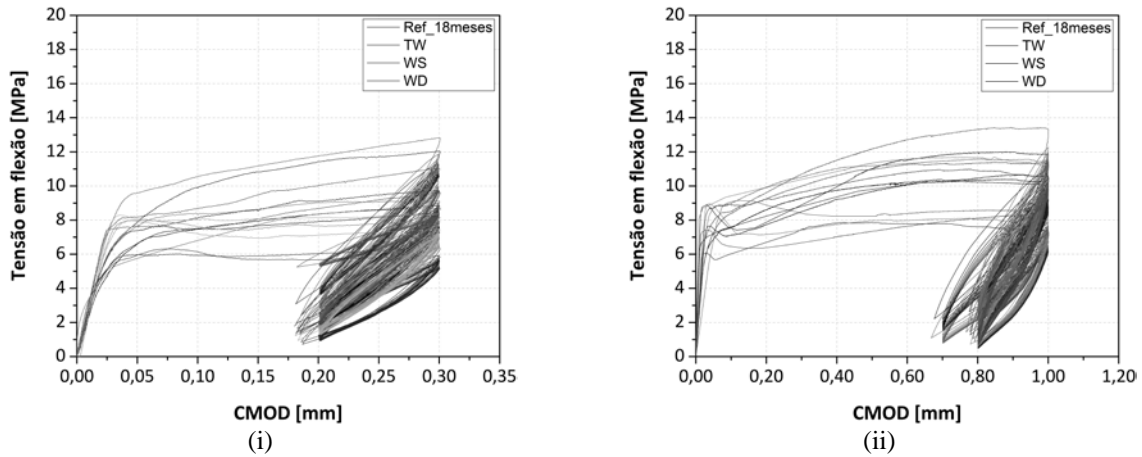


Figura 4 – Provetes sujeitos a ensaios cíclicos aos 18 meses: i) provetes previamente sujeitos a CMOD máximo de 0.30 mm; provetes previamente sujeitos a CMOD máximo de 1.0 mm.

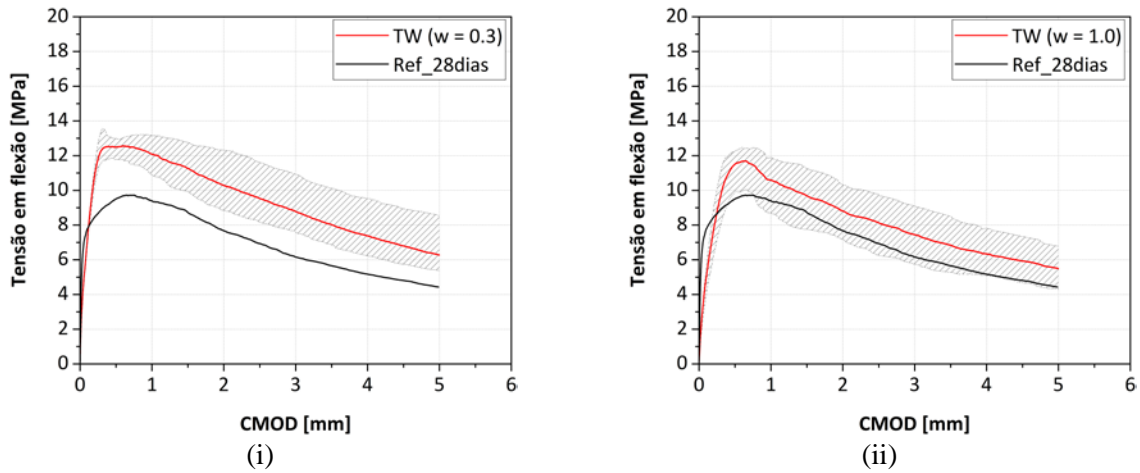


Figura 5 – Comparação da resposta tensão em flexão vs. CMOD obtida para os provetes de referência e para os provetes TW: i) provetes previamente sujeitos a CMOD máximo de 0.30 mm; provetes previamente sujeitos a CMOD máximo de 1.0 mm.

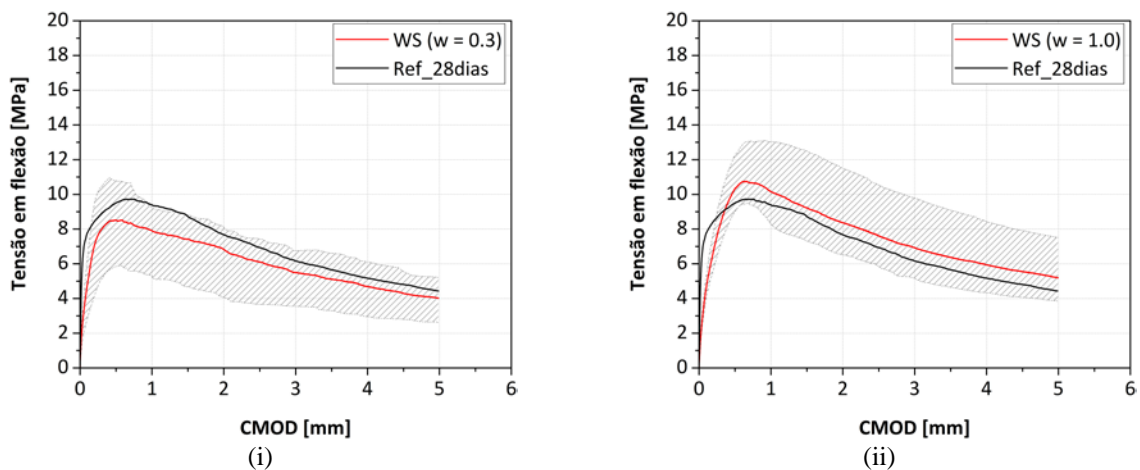


Figura 6 – Comparação da resposta tensão em flexão vs. CMOD obtida para os provetes de referência e para os provetes WS: i) provetes previamente sujeitos a CMOD máximo de 0.30 mm; provetes previamente sujeitos a CMOD máximo de 1.0 mm.

Influência da exposição ambiental no comportamento pós-fissurado de betão auto-compactável reforçado com fibras de aço

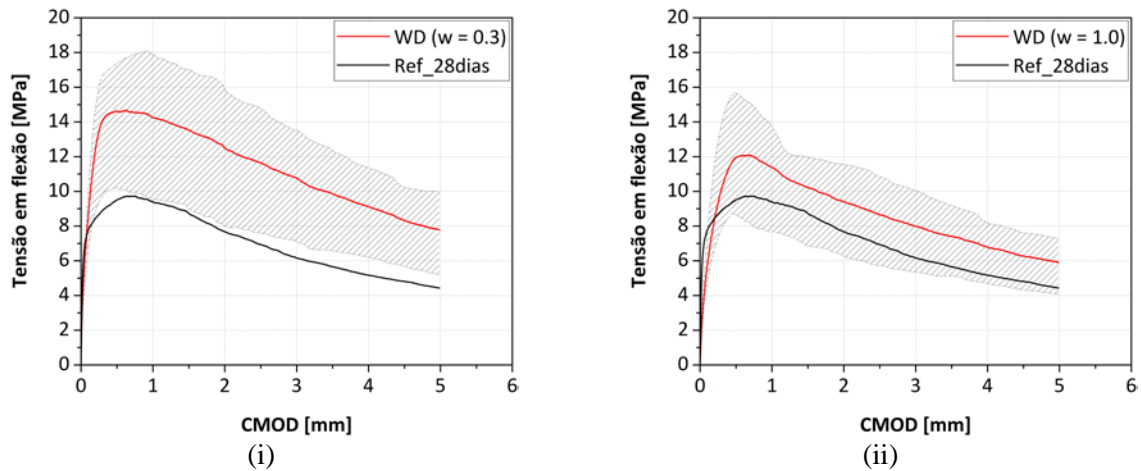


Figura 7 – Comparação da resposta tensão em flexão vs. CMOD obtida para os provetes de referência e para os provetes WD: i) provetes previamente sujeitos a CMOD máximo de 0.30 mm; provetes previamente sujeitos a CMOD máximo de 1.0 mm.

Observando as Figs. 4 a 7 é possível constatar que a resposta tensão em flexão *versus* CMOD dos provetes ensaiados, após exposição ambiental, apresenta uma menor rigidez inicial, tal como seria de esperar pois estes já se encontram fissurados. Também as tensões residuais obtidas são superiores para as séries TW, WS e WD, com exceção da série WS ($w=0.3$). Para este resultado terão provavelmente contribuído a maior idade de maturação do betão, comparativamente com a série de referência de 28 dias, e o processo de auto-reparação da fenda que foi detetado visualmente em diversos provetes e terá contribuído para a proteção das fibras relativamente aos fatores de exposição ambiental, assim como a proteção por galvanização das fibras.

De uma forma geral, observa-se uma moderada dispersão de resultados, nomeadamente na série WD ($w=0.3$), que pode ser justificada pelo fenómeno de selagem da fenda observado em vários provetes, que terá contribuído para a proteção das fibras e para o incremento da resiliência ao deslizamento ao nível da interface entre as fibras e matriz.

4.2 Secção de fratura e número de fibras

No final de cada ensaio de flexão em 3 pontos separou-se cada provete em duas metades, expondo a secção de fratura. Imediatamente a seguir, após acondicionamento dos provetes, pulverizou-se uma das superfícies de fratura com uma solução fenolftaleína e a outra com solução de nitrato de prata, com o intuito de visualizar o perfil de penetração de cloretos e o perfil de carbonatação, respetivamente. A Fig. 8 apresenta um perfil típico, para uma abertura de fenda de 1.0 mm, obtido num dos ensaios realizados.



Figura 8 – Perfil da penetração de cloretos (face esquerda) e da carbonatação (face direita).

Como se pode observar na Fig. 8, a fenda não se desenvolve de igual forma em toda a profundidade da secção, mas antes adotando a forma aproximadamente parabólica, evidenciando claramente a zona da

secção de fratura do betão que se encontra exposta a uma maior abertura de fissura, na fase pré-fendilhada. Esta geometria aproximadamente parabólica da frente da fenda ao longo da superfície de fratura está de acordo com outros estudos realizados [13]. Convém salientar que não se realizaram estudos relativos à velocidade de penetração de cloretos ou a outros indicadores de durabilidade dado que apenas se pretendeu avaliar qualitativamente as zonas afetadas pela migração de cloretos e a profundidade da carbonatação, as quais estão intrinsecamente interligadas.

No Quadro 2 apresenta-se o número de fibras identificadas em cada uma das superfícies de fratura dos provetes ensaiados. Na generalidade as séries revelaram um número semelhante de fibras na superfície de fratura, com a exceção da série WS (w=0.3).

Quadro 2 – Número médio de fibras na superfície de fratura.

Série	Nº médio de fibras na face esquerda		Nº médio de fibras na face direita		Nº total de fibras	Nº total de fibras ativas
	Total	Nº de fibras ativas	Total	Nº de fibras ativas		
Ref_28dias	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	307	n.a.
TW _(w=0.3)	146	116	140	113	286	229
TW _(w=1.0)	139	120	140	128	279	248
WS _(w=0.3)	119	106	115	103	234	209
WS _(w=1.0)	175	154	179	163	354	317
WD _(w=0.3)	166	151	148	134	314	284
WD _(w=1.0)	148	132	150	131	298	263

Em diversos provetes verificou-se que o BACRFA apresentou capacidade de regeneração autógena, designado na literatura inglesa de “*autogeneous self-healing*”. Esta capacidade regenerativa, aliada à evolução da maturidade do betão, poderá ter contribuído para um aumento do desempenho pós-fissurado em flexão dos provetes prismáticos expostos às três condições ambientais estudadas. Este fenómeno, abordado por diversos autores, e.g. [14,-16], está associado à quantidade de cimento não hidratado existente na matriz, que quando em contacto com água permite, por intermédio da reação dos iões de cálcio (Ca^{2+}) com as moléculas de carbono (CO_2) presentes nos poros, a formação de um precipitado de CaCO_3 capaz de regenerar pequenas fissuras. No caso de betões reforçados com fibras, este fenómeno é potenciado pela teia de fibras que atravessa as superfícies de fratura, a qual beneficia a retenção do CaCO_3 . Na Fig. 9 apresenta-se um conjunto de imagens obtidas com microscópio ótico, fator de ampliação de 400 e 20 vezes, respetivamente, onde é clara a presença de precipitados CaCO_3 colmatando a pré-fissura .

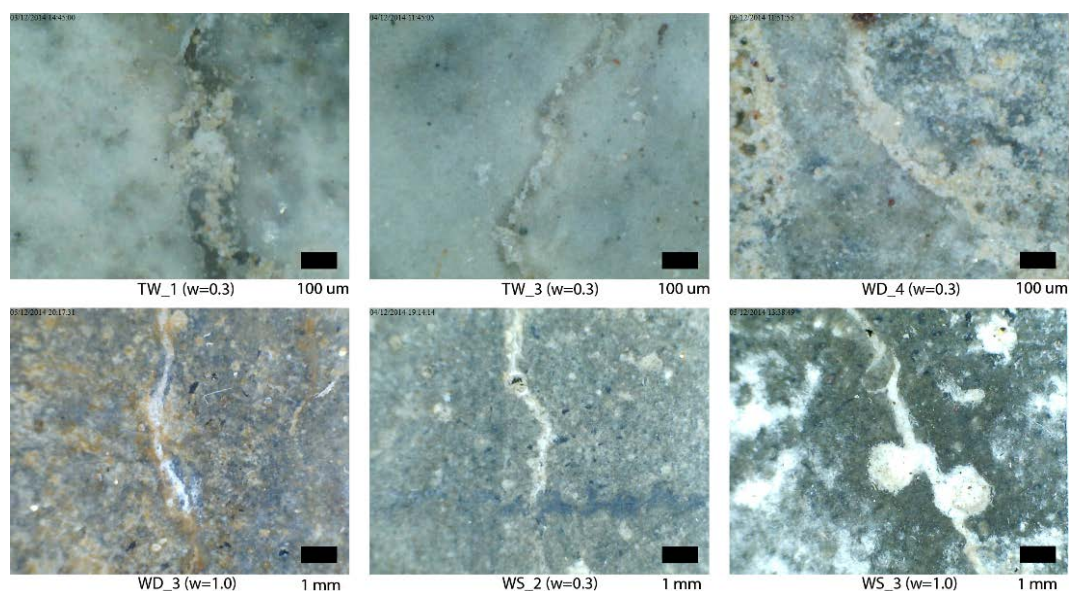


Figura 9 – Formação de precipitados de carbonato de cálcio em diversas fissuras, de vários provetes.

O grau de corrosão das fibras de aço foi avaliada de forma qualitativa. Apesar das fibras possuírem uma proteção galvânica, a corrosão galvânica pode ocorrer, fenómeno que se produz devido ao elevado fluxo de eletrões entre metais durante as reações oxidação-redução. Também não se efetuaram estudos relativos à resistividade elétrica do betão, não sendo possível avaliar o fluxo eletrolítico entre metais. No entanto, a caracterização deste processo é de elevada complexidade porque nem sempre é fácil de avaliar o nível de oxidação das fibras de aço, dado que alguns dos produtos resultantes da corrosão do zinco, como os complexos de carbonato de zinco ($ZnCO_3$) podem novamente migrar para zona do metal desprotegido, oferecendo novamente uma barreira de proteção às fibras de aço.

No caso em estudo observou-se que a maioria das fibras de aço não apresentava sinais de deterioração, apresentando indícios claros de passivação tal como se pode observar na Fig. 10, à esquerda, pela formação de um produto à base de zinco com coloração branca, junto a uma das fibras. Apenas em situações particulares se observou o aparecimento de pequenas zonas oxidadas, onde a proteção ficou comprometida. Em geral, o desempenho das fibras de aço galvanizadas sujeitas às ações ambientais foi adequado, no entanto o estudo realizado carece de confirmação futura por intermédio de outros ensaios de degradação ambiental acelerada e agressiva.

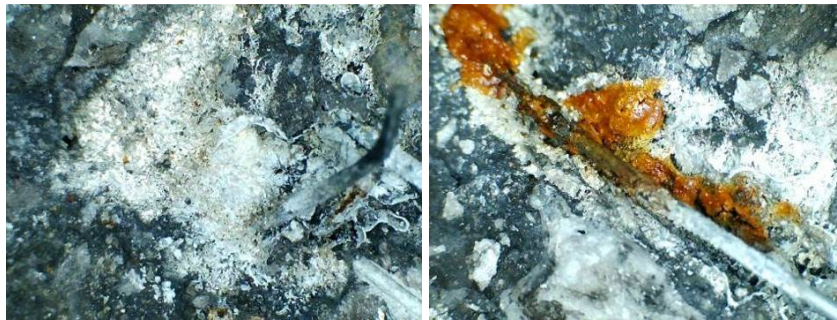


Figura 10 – Passivação das fibras de aço à esquerda e indícios de corrosão à direita.

4.3 Tensões residuais e equivalentes à tração em flexão

As tensões de tração residuais e equivalentes em flexão foram determinadas a partir das recomendações dispostas na norma [12]. No Quadro 3 apresentam-se os valores médios das tensões obtidas para cada série, sendo que $f_{jct,L}$ representa a tensão limite de proporcionalidade, δ_L representa o deslocamento a meio vão correspondente ao limite de proporcionalidade; $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ traduzem a tensão de tração equivalente em flexão 2 e 3, respetivamente; $f_{R,j}$ indica a resistência residual em flexão correspondente ao $CMOD_j$.

Quadro 3 – Tensões residuais em flexão dos provetes prismáticos.

<i>Provetes</i>		$f_{jct,L}$ [MPa]	δ_L [mm]	$f_{eq,2}$ [MPa]	$f_{eq,3}$ [MPa]	$f_{R,1}$ [MPa]	$f_{R,2}$ [MPa]	$f_{R,3}$ [MPa]	$f_{R,4}$ [MPa]
Ref_28dias	Avg.	5.88	0.05	9.77	8.24	9.51	8.72	6.94	5.66
	CoV	(3%)	(0%)	(8%)	(10%)	(8%)	(12%)	(10%)	(10%)
TW _(w=0.3)	Avg.	(*)	0.05	13.24	11.09	12.50	11.26	9.53	8.02
	CoV	(*)	(1%)	(4%)	(9%)	(4%)	(9%)	(13%)	(16%)
TW _(w=1.0)	Avg.	(*)	0.05	11.44	9.59	11.51	9.69	8.12	6.85
	CoV	(*)	(1%)	(10%)	(11%)	(8%)	(13%)	(15%)	(17%)
WS _(w=0.3)	Avg.	(*)	0.05	8.82	7.21	8.38	7.41	6.11	5.12
	CoV	(*)	(1%)	(22%)	(22%)	(23%)	(22%)	(24%)	(23%)
WS _(w=1.0)	Avg.	(*)	0.05	10.30	8.75	10.32	9.23	7.61	6.37
	CoV	(*)	(1%)	(13%)	(22%)	(14%)	(25%)	(27%)	(30%)
WD _(w=0.3)	Avg.	(*)	0.05	15.09	13.10	14.56	13.47	11.59	9.82
	CoV	(*)	(0%)	(21%)	(25%)	(21%)	(25%)	(26%)	(25%)
WD _(w=1.0)	Avg.	(*)	0.05	11.97	10.11	11.94	10.22	8.66	7.41
	CoV	(*)	(1%)	(21%)	(20%)	(21%)	(19%)	(21%)	(20%)

(*) – Não foi calculada a tensão limite de proporcionalidade, uma vez que estas séries já se encontram pré-fissuradas.

Através do quadro 3 é possível observar-se claramente um acréscimo das tensões residuais dos provetes submetidos às ações de exposição ambiental face aos da série de referência a 28 dias, nomeadamente as séries TW, WS e WD, excetuando a série WS ($w=0.3$), tal como referido anteriormente.

Para as tensões residuais f_{R1} , correspondentes ao estado limite de serviço, registam-se aumentos de 8% e 53%, para as séries WS ($w=1.0$) e WD ($w=0.3$), respetivamente. Para as séries WS ($w=0.3$) verifica-se uma redução de 12%. Quanto às tensões residuais f_{R2} , correspondentes ao estado limite último, observaram-se aumentos de 10% e 67%, correspondentes às séries WS ($w=1.0$) e WD ($w=0.3$), respetivamente. Para a série WS ($w=0.3$) observa-se uma redução de 12%. Em suma, as séries WD apresentam um melhor desempenho mecânico em flexão, seguindo-se as séries TW e WS. Também pode constatar-se que as tensões residuais em flexão obtidas são maiores para as séries de provetes que foram sujeitos a um CMOD máximo de 0.3 mm, comparativamente com os das séries de 1.0 mm. Como seria de esperar, apenas não se verificou este padrão na série WS ($w=0.3$).

CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentou-se o estudo da influência de três tipos de exposição ambiental distintas, durante um período de 18 meses, nas propriedades mecânicas de betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (BACRFA). Os provetes prismáticos foram pré-fissurados por intermédio de ensaios cíclicos, tendo-se atingido aberturas de fenda de 0.3 mm e 1.0 mm. Posteriormente, os provetes foram sujeitos a ambientes de distinta agressividade: uma das séries foi submersa em água, sem adição de sais (TW), outra foi submersa em água com uma concentração de sal (NaCl) de 3% (WS) e outra série ainda foi submetida a ciclos de molhagem e secagem, em que na fase molhada os provetes ficaram submersos em água com sal (NaCl) com uma concentração de 3%, e durante a fase seca ficaram emersos e expostos a uma temperatura de aproximadamente 32°C, durante ciclos de 12h.

No final da fase de exposição ambiental, a zona da abertura de fenda foi examinada com recurso a um microscópio ótico. Observou-se em diversos provetes a presença de precipitados de carbonato de cálcio (CaCO_3), identificados como cristais com tonalidade branca nas zonas de abertura de fenda. Posteriormente, os provetes foram submetidos a ensaios de flexão em 3 pontos, de forma a avaliar a possível degradação do comportamento mecânico. Também se avaliou de forma qualitativa a penetração de cloretos e a carbonatação na secção de fratura dos provetes de BACRFA, de modo a identificar a evolução da propagação da fenda na secção e correlacionar esta análise com a evolução da corrosão das fibras.

Quanto ao comportamento em flexão observou-se que as séries WD apresentaram um melhor desempenho comparativamente com as séries TW, seguindo-se as séries WS. Em geral obtiveram-se tensões residuais em flexão superiores para as séries sujeitas a CMOD de 0.30 mm quando comparadas com as séries sujeitas a CMOD de 1.0 mm, sendo este o resultado expectável. Apenas não se verificou esta tendência na série WS ($w=0.3$).

Os ensaios de análise da penetração de cloretos e de carbonatação permitiram identificar o desenvolvimento da frente de fissuração nas secções úteis de cada provete, originadas durante a fase dos ensaios cíclicos. Permitiram também correlacionar empiricamente a zona da secção mais exposta aos fatores ambientais, nomeadamente aos que estão relacionados com a corrosão por migração de cloretos. Desta análise conclui-se que, na generalidade, as fibras de aço apresentaram um desempenho satisfatório em termos de durabilidade, sobretudo por possuírem proteção galvânica conferida pelo zinco. Observou-se oxidação apenas pontualmente em alguns dos provetes, sendo que na restante maioria se observaram precipitados de produtos resultantes da oxidação do zinco, identificados por manchas brancas.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por fundos FEDER através do Programa Operacional Factores de Competitividade - COMPETE e fundos Nacionais FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia referente ao projeto SlabSys - HFRC PTDC/ECM/120394 /2010. Os autores querem igualmente

expressar o seu agradecimento às empresas Tecnipor Lda. e Bekaert, pelo auxílio na betonagem dos provetes e fornecimento das fibras, respetivamente.

REFERÊNCIAS

- [1] Zollo, R. F. (1997). Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 19, N. 2, pp. 107-122.
- [2] di Prisco, M., [et al.] (2009). Fibre reinforced concrete: new design perspectives. *Materials and Structures*, Vol. 42, N. 9, pp. 1261-1281.
- [3] Cuenca, E. (2015). On Shear Behavior of Structural Elements Made of Steel Fiber Reinforced Concrete, Springer International Publishing., 209 p. ISBN 978-3-319-13686-8.
- [4] Cunha, V. [et al.] (2010). Pullout Behavior of Steel Fibers in Self-Compacting Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 22, N. 1, pp. 1-9.
- [5] Okamura H.; O. k., Ouchi M. (2000). Self-compacting concrete. *Structural Concrete*, Vol. 1, N. 1, pp. 3-17.
- [6] Corinaldesi, V.; G. Moriconi (2004). Durable fiber reinforced self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, N. 2, pp. 249-254.
- [7] Bassuoni, M. T.; M.L. Nehdi (2009). Durability of self-consolidating concrete to sulfate attack under combined cyclic environments and flexural loading. *Cement and Concrete Research*, Vol. 39, N. 3, pp. 206-226.
- [8] Lau, A.; M. Anson (2006). Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, N. 9, pp. 1698-1707.
- [9] Frazão, C. [et al.] (2014). Durabilidade do Betão Auto-Compactável Reforçado com Fibras de Aço. *Sas Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas*.
- [10] EFNARC. (2002). Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. Farnham, Surrey. EFNARC.
- [11] EN 14651:2005+A1:2007. (2007). Test method for metallic fibre concrete : measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual) : EN 14651:2005+A1: 2007. Brussels : CEN, cop. 2007
- [12] RILEM TC 162-TDF. (2000). Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. Bagneux.
- [13] Shah, S. P. [et al.] (1995). Fracture Mechanics of Concrete: Applications of Fracture Mechanics to Concrete, Rock and Other Quasi-Brittle Materials, Wiley., 588 p. ISBN 978-0-471-30311-4.
- [14] Yang, Y. [et al.] (2009). Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet-dry cycles. *Cement and Concrete Research*, Vol. 39, N. 5, pp. 382-390.
- [15] Van Tittelboom, K. [et al.] (2012). Influence of mix composition on the extent of autogenous crack healing by continued hydration or calcium carbonate formation. *Construction and Building Materials*, Vol. 37, N. 0, pp. 349-359.
- [16] Snoeck, D. [et al.] (2014). Self-healing cementitious materials by the combination of microfibres and superabsorbent polymers. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 25, N. 1, pp. 13-24