

Comportamento em Tracção Uniaxial e Flexão de Betão Auto-Compactável Reforçado com Fibras de Aço



Vítor M. C. F. Cunha¹



Joaquim A. O. Barros²



José M. Sena-Cruz³

RESUMO

O betão auto-compactável reforçado com fibras de aço, BACRFA, combina os benefícios da tecnologia do betão auto-compactável com os inerentes à adição de fibras de aço a um material frágil de matriz cimentícia. Devido às especificidades intrínsecas à tecnologia do betão auto-compactável, os diversos mecanismos de reforço provenientes da mobilização das fibras diferem ligeiramente dos observados num betão convencional reforçado com fibras de aço, BRFA, repercutindo-se desta forma, em diferenças ao nível das propriedades mecânicas destes materiais compósitos. Actualmente, mesmo os BRFA ainda são relativamente pouco utilizados em aplicações estruturais, isto se tivermos em mente, que o aparecimento deste material compósito data do início dos anos 60. Um dos aspectos que contribui para esta reduzida utilização é a elevada dispersão observada no comportamento mecânico de BRFA, em parte devida a uma distribuição não uniforme das fibras na matriz. O BACRFA permite quer uma distribuição das fibras mais uniforme, quer uma orientação mais efectiva segundo a direcção do escoamento de betonagem, num provete ou elemento estrutural. Presentemente, é reconhecido que o BACRFA exhibe um melhor comportamento pós-fendilhado, com uma menor variabilidade, comparativamente ao comportamento do BRFA. No presente artigo é apresentado o comportamento mecânico quer em tracção uniaxial, quer em flexão de BACRFA. Com este intuito foi realizado um programa experimental constituído por duas séries com diferentes percentagens volumétricas de fibras, uma com 0,38% e outra com 0,57%. Os principais resultados obtidos nos ensaios de tracção uniaxial e flexão são apresentados e discutidos.

PALAVRAS-CHAVE

Fibras de aço, comportamento mecânico, tracção uniaxial, tracção em flexão.

¹ ISISE, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Escola de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharias 5001-801 Vila Real, Portugal. vcunha@utad.pt

² ISISE, Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, Portugal. barros@civil.uminho.pt

³ ISISE, Universidade do Minho, Escola de Engenharia Departamento de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, Portugal. jsena@civil.uminho.pt

1. INTRODUÇÃO

O uso de betão auto-compactável reforçado com fibras de aço, BACRFA, provavelmente, aumentará significativamente num futuro próximo, visto que da aplicação deste material compósito advêm inúmeras vantagens ao nível da tecnologia do betão. O BACRFA combina os benefícios da tecnologia do betão auto-compactável com os inerentes à adição de fibras de aço a um material frágil de matriz cimentícia.

A capacidade de absorção de energia destes materiais, a sua resistência ao impacto e à tracção são das propriedades mais beneficiadas pela adição de fibras a uma matriz cimentícia [1]. Apesar dos benefícios da adição de fibras em matrizes convencionais estarem amplamente disseminados e quantificados, o mesmo ainda não ocorre nos betões auto-compactáveis. Devido às especificidades intrínsecas à própria tecnologia do betão auto-compactável, os diversos mecanismos de reforço provenientes da mobilização das fibras diferem ligeiramente dos observados num betão convencional reforçado com fibras de aço, repercutindo-se desta forma, em diferenças ao nível das propriedades mecânicas destes materiais compósitos [2].

Actualmente, os betões convencionais reforçados com fibras de aço, BRFA, ainda são relativamente pouco utilizados em aplicações estruturais, isto se tivermos em mente, que o aparecimento deste material compósito data do início dos anos 60 [1]. Um dos aspectos que contribui para esta reduzida utilização, bem como para uma certa desconfiança dos projectistas neste material, é a elevada dispersão observada no comportamento mecânico de BRFA, em parte devida a uma distribuição não uniforme das fibras na matriz. Por esta razão, de forma a se ultrapassar os preconceitos relativamente ao BRFA, é de extrema importância a redução da variabilidade do comportamento mecânico e, conseqüentemente, a adopção de factores de segurança mais baixos [3]. O BACRFA permite quer uma distribuição de fibras mais uniforme, quer uma orientação mais efectiva segundo a direcção do escoamento da betonagem, num provete ou elemento estrutural, em parte devido às suas propriedades reológicas no estado fresco [2, 3]. Presentemente, é reconhecido que o BACRFA exhibe um melhor comportamento pós-fendilhado, com uma menor dispersão, comparativamente ao BRFA.

No presente artigo é abordado o comportamento mecânico em tracção uniaxial e em flexão de BACRFA. Com este intuito foi realizado um programa experimental constituído por duas séries com diferentes percentagens volumétricas de fibras, uma com 0,38% e outra com 0,57%. Os principais resultados obtidos nos ensaios de tracção uniaxial e flexão são apresentados e discutidos, tendo-se dado particular ênfase ao comportamento pós-fissurado do BACRFA.

2. MATERIAIS E PROVETES

As quantidades e descrição dos materiais utilizados na composição do BACRFA, assim como o procedimento adoptado no seu fabrico, podem ser encontrados em [4]. No presente estudo do comportamento mecânico à tracção uniaxial e à tracção em flexão foram estudadas duas séries com distintas quantidades de fibras (Cf): 30 e 45 kg/m³, designadas de Cf30 e Cf45, respectivamente. O Quadro 1 inclui as quantidades dos constituintes da composição que melhor se ajustou aos requisitos de auto-compactibilidade, para as duas quantidades de fibras adoptadas. De salientar, no Quadro 1, que WS corresponde à parcela de água necessária para saturar os agregados (FS – areia fina, CS – areia grossa e CA – brita) e W/C é o ratio água/cimento. A parcela WS não foi utilizada para calcular a relação W/C. As fibras utilizadas possuíam ancoragens nas suas extremidades em forma de “gancho”, com comprimento nominal ($l_f = 60$ mm), diâmetro ($d_f = 0.75$ mm), coeficiente de forma nominal ($l_f/d_f = 80$) e tensão de cedência de 1100 MPa.

Para cada uma das séries foram betonados oito cilindros, com um diâmetro de 150 mm e 300 mm de altura, assim como cinco vigas com um comprimento de 600 mm e uma secção transversal de 150×150 mm². Três dos cilindros foram utilizados para aferir a resistência à compressão de cada serie. À data dos ensaios, a série Cf30 tinha uma resistência à compressão média de 71.1 MPa, com um

coeficiente de variação, CoV, de 1.9 %, enquanto a série Cf45 tinha uma resistência à compressão média de 67.2 MPa, com um CoV de 1.4 %.

Quadro 1. Composição para 1 m³ de BACRFA.

<i>Cf</i> [kg]	<i>C</i> [kg]	<i>LF</i> [kg]	<i>W</i> [dm ³]	<i>WS</i> [dm ³]	<i>SP</i> [dm ³]	<i>FS</i> [kg]	<i>CS</i> [kg]	<i>CA</i> [kg]
30	359.4	312.2	96.9	64.7	6.9	108.2	709.4	665.2
45	401.7	344.2	117.3	65.4	7.6	178.3	668.1	668.1

3. ESQUEMA DE ENSAIO

3.1 Tracção uniaxial

Os ensaios de tracção uniaxial dos provetes de BACRFA foram realizados de acordo com a recomendação da RILEM [5]. Segundo o referido documento, deverá ser utilizado um provete entalhado, com 150 mm de diâmetro e altura. Os provetes foram obtidos a partir de um cilindro standard com 300 mm de altura. Adicionalmente, um entalhe com 15 mm de profundidade e 5 mm de espessura foi efectuado ao longo do perímetro do provete. O entalhe está localizado a meia altura do provete final, i.e metade de 150 mm. As operações de corte foram efectuadas com especial cuidado, de forma a garantir que o entalhe fosse perpendicular ao eixo longitudinal do provete.

Após efectuar as operações de corte, cada cilindro foi cuidadosamente rectificando e os seus topos limpos com solvente e ar comprimido. O provete foi colado “in situ” aos pratos de aplicação de carga da prensa utilizada. Para o devido efeito foi seleccionada uma resina epoxy de elevada resistência, que segundo o fabricante tem uma resistência, aproximadamente, de 30 MPa à tracção uniaxial e 4 a 8 MPa à aderência (dependendo das superfícies dos materiais e características do tratamento destas).

Os ensaios foram realizados numa prensa servo-hidraulica de elevada rigidez, com uma capacidade de 2000 kN, Fig. 1a. Para a realização dos ensaios de forma estável, estes foram executados sob controlo de deslocamento da média das leituras de três transdutores. Estes transdutores encontravam equidistantemente dispostos ao longo do perímetro do provete, montados em dois anéis de aço próximos da zona do entalhe, Fig. 1b. O campo de leitura dos referidos transdutores foi de 35 mm, de salientar que este valor é menor que o limite superior (40 mm) recomendado por [5]. Durante o ensaio foram utilizadas duas velocidades de deformação, designadamente, 5 µm/min até um deslocamento de 0.1 mm e 100 µm/min até à finalização do ensaio, i.e. 2 mm, conforme o recomendado por [5].

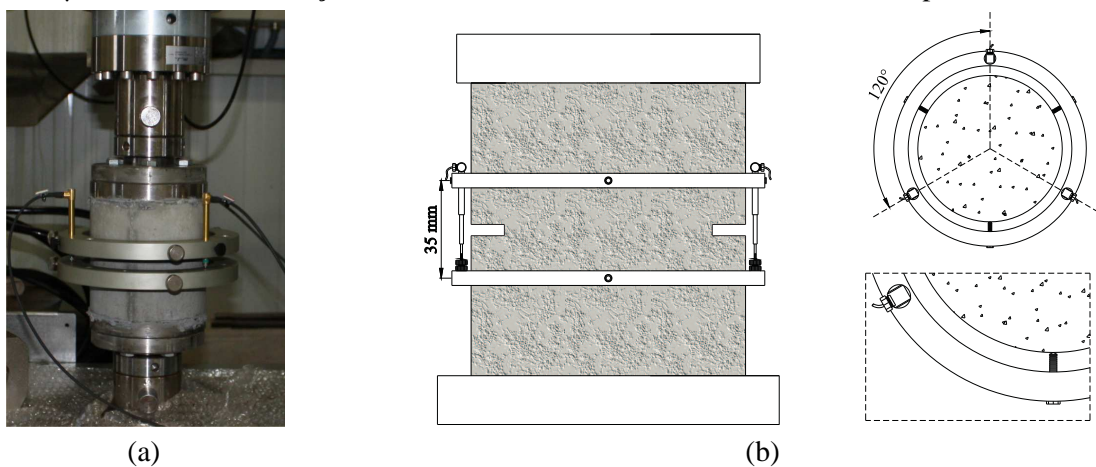


Figura 1. Esquema de ensaio à tracção uniaxial: (a) vista geral, (b) posicionamento dos transdutores de deslocamento.

3.2 Flexão em três pontos

O comportamento mecânico à tracção em flexão do BACRFA foi obtido de acordo com as recomendações da RILEM [6]. Na generalidade, a totalidade dos requisitos sugeridos pela referida norma para a preparação dos provetes foram cumpridos. Contudo, o procedimento de betonagem dos moldes sugerido em [6] não é aplicável ao presente caso, visto que a elevada fluidez do betão auto-compactável utilizado não o permitiu. Obviamente, também não se vibraram os provetes, visto se tratar de BACRFA.

Nos ensaios foram utilizados provetes com um comprimento de 600 mm e uma secção transversal de $150 \times 150 \text{ mm}^2$. As vigas foram entalhas a meio-vão, numa das faces perpendiculares à superfície de betonagem, conforme sugerido em [6]. A profundidade e espessura do entalhe foram 25 e 5 mm, respectivamente. Os provetes foram colocados sobre apoios de roletes, perfazendo um vão livre de 500 mm.

Os ensaios foram realizados em controlo de deslocamento através do transdutor posicionado a meio-vão, Fig. 2a, com uma velocidade de deformação de 0.2 mm/s. A abertura de fenda na boca do entalhe, CMOD, foi medida conforme o representado na Fig. 2b. O campo de leitura do transdutor, para a determinação do CMOD, foi de 35 mm tendo sido efectuado entre dois pontos de referência equidistantes ao entalhe.

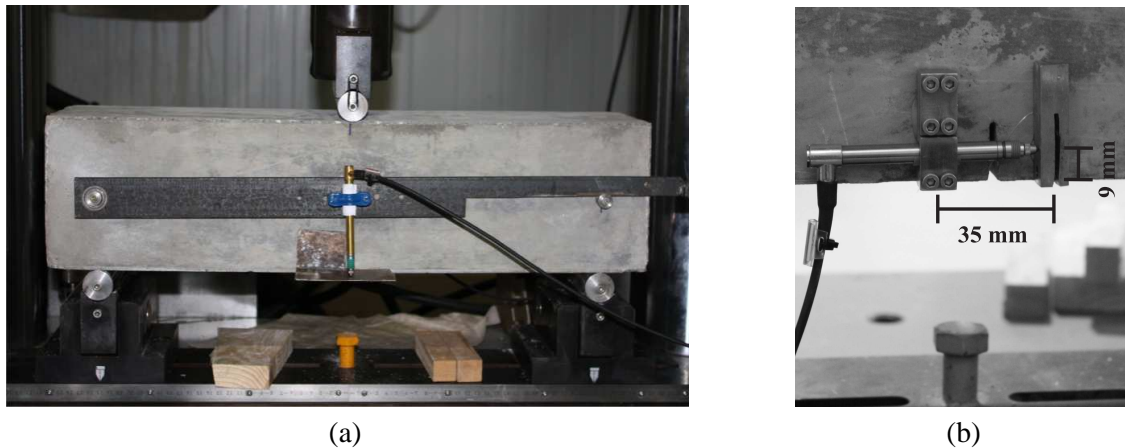


Figura 2. Esquema de ensaio à flexão: (a) vista geral, (b) leitura do CMOD.

4. COMPORTAMENTO MECÂNICO À TRACÇÃO UNIAXIAL

4.1 Relação tensão – abertura de fenda ($\sigma - w$)

Nas Figuras 3 e 4 incluem-se as envolventes experimentais das relações tensão – abertura de fenda obtidas para as séries Cf30 e Cf45, respectivamente. A relação tensão – abertura de fenda ($\sigma-w$) foi adquirida a partir da curva tensão – deslocamento a meio-vão, de acordo com o preconizado nas recomendações de [5]. Adicionalmente, as curvas médias e característica são também incluídas nas referidas figuras. A curva característica $\sigma-w$ correspondente ao limite inferior (L.I.) e limite superior (L.S.) com um intervalo de confiança de $k = 95 \%$ foi determinada através da curva média obtida a partir da resposta individual dos provetes ensaiados, $\bar{\sigma}_w(w)$, de acordo com [5]:

$$\sigma_{w,k}(w) = \bar{\sigma}_w(w) \frac{G_{F2mm,k}}{\bar{G}_{F2mm}} \quad (1)$$

em que \bar{G}_{F2mm} é o valor médio da energia dissipada até uma abertura de fenda de 2 mm, e G_{F2mm} é o valor característico da energia dissipada para a referida abertura de fenda. Para determinar G_{F2mm} foi assumida uma distribuição t-Student.

Na totalidade dos ensaios efectuados, o aparecimento da fenda ocorreu ao longo do plano do entalhe, por conseguinte foi garantida a localização desejada da fenda. Após a localização da fenda, a tensão decresce abruptamente até uma abertura de fenda aproximada de 0.10 mm (ver lado direito das Figs. 3 e 4). A partir desta abertura de fenda observou-se uma resposta em patamar ou endurecimento plástico. Em geral, observa-se um endurecimento para os provetes da série Cf45, contudo este tipo de comportamento também é observado para alguns provetes da série Cf30 [2]. Após o patamar observado na série Cf30, i.e. para uma abertura de fenda superior a 0.8 mm, a tensão residual começa a diminuir devido a decréscimos localizados de resistência correspondentes ao rompimento das fibras. As respostas individuais dos provetes ensaiados, nas quais é mais perceptível as referidas quedas abruptas da tensão residual podem ser encontradas em [2].

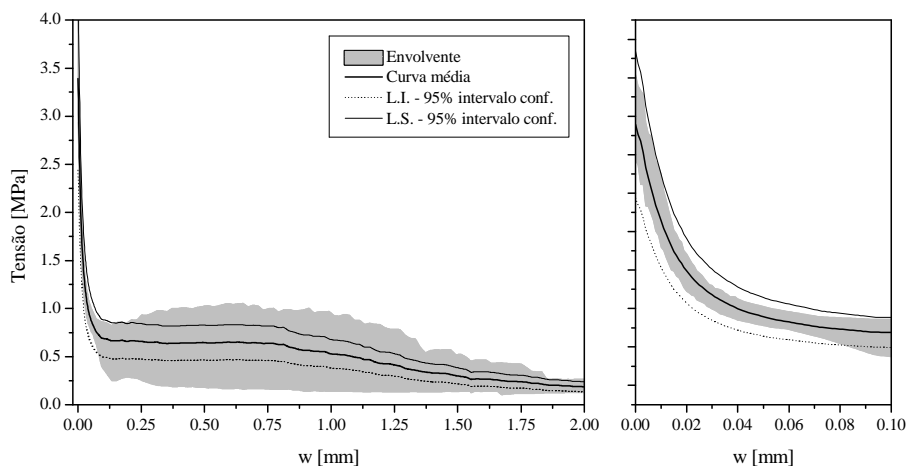


Figura 3. Relação tensão – abertura de fenda para a série Cf30.

De acordo com [7], o ângulo médio entre uma fibra activa (i.e. que seja mobilizada) que atravesse uma determinada fenda é de 35° (este valor foi determinado analiticamente através da teoria das probabilidades geométricas), um valor semelhante, de 34° , tinha sido previamente obtido experimentalmente por [8]. Resultados de ensaios micro-mecânicos, efectuados para o tipo de fibras e matriz utilizadas no presente trabalho, indicam a ocorrência do rompimento das fibras para uma inclinação de 30° relativamente à direcção da força de arrancamento, i.e. direcção perpendicular ao plano da fenda. Este modo de fractura ocorreu para valores de deslizamento compreendidos entre 0.6 a 1.0 mm [2]. Poder-se-á admitir simplifadamente, e para a ordem de grandeza dos valores do deslizamento, que a abertura de fenda será aproximadamente idêntica ao deslizamento da fibra. Os factos previamente apresentados justificam, de certa forma, a ocorrência dos referidos decréscimos abruptos da resistência residual para aberturas de fenda superiores a 0.8 mm observados na série Cf30, onde o número de fibras activas é relativamente reduzido para a resistência da matriz.

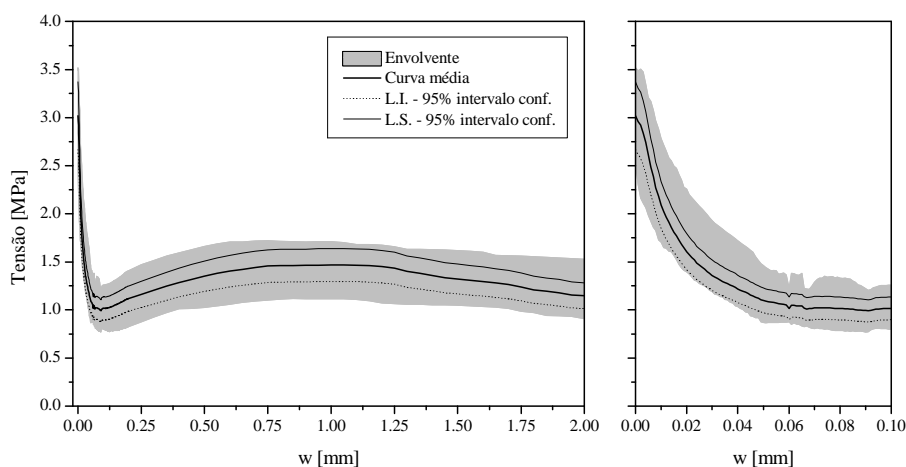


Figura 4. Relação tensão – abertura de fenda para a série Cf45.

Relativamente à série Cf45 (Fig. 4), o endurecimento observado no comportamento pós-fissurado pode ser atribuído a duas razões: um maior número de fibras activas que intersectam a fenda, assim como uma menor resistência à compressão e rigidez da série Cf45 comparativamente a Cf30. Por conseguinte, as propriedades de aderência na interface fibra/matriz (inferiores às da série Cf30) não são tão favoráveis à ocorrência do rompimento da fibra. Similarmente ao ocorrido para a série Cf30, a tensão residual decresce após a carga de pico até uma tensão residual mínima, correspondente a uma abertura de fenda de aproximadamente 0.10 mm. Conforme o observado no comportamento micro-mecânico deste tipo de fibras [2], após aberturas de fenda desta ordem de grandeza, o principal mecanismo de reforço das fibras passa a ser a deformação plástica das ancoragens nas extremidades das fibras. Dado existir um maior número de fibras a intersectarem a fenda, e devido a uma menor resistência à tracção na série Cf45, a energia libertada durante o processo de fendilhação é menor comparativamente à série Cf30. Adicionalmente, devido à menor resistência e rigidez da matriz de Cf45, a ocorrência do rompimento das fibras não foi tão frequente como em Cf30. Como consequência directa, após uma abertura de fenda aproximadamente de 0.1 mm ocorreu um endurecimento até uma abertura de fenda de 1 mm.

4.2 Parâmetros de fractura

O Quadro 1 inclui os valores médios e característicos das tensões residuais e energias dissipadas, para determinadas aberturas de fenda, obtidos nos ensaios de tracção uniaxial. Adicionalmente, inclui os respectivos coeficientes de variação. Na tabela referida, σ_{peak} é a tensão máxima, enquanto $\sigma_{0.3mm}$, σ_{1mm} e σ_{2mm} são as tensões para uma abertura de fenda de 0.3, 1 e 2 mm, respectivamente. G_{F1mm} e G_{F2mm} são a energia dissipada até uma abertura de fenda de 1 e 2 mm, respectivamente. Os valores característicos dos referidos parâmetros foram obtidos para um intervalo de confiança $k = 95\%$ assumindo uma distribuição t-Student. A normalidade da distribuição foi verificada com o teste de Shapiro-Wilk [9].

Da análise dos parâmetros apresentados no Quadro 2 é visível, que em geral, há um aumento das tensões e energias dissipadas com o aumento da quantidade de fibras, como esperado. A única excepção foi a tensão de pico, tendo sido cerca de 10 % inferior na série Cf45. Esta diminuição da tensão de pico deve-se principalmente às diferenças entre esqueleto sólido e adições das composições de betão, de forma a garantir os requisitos de auto-compactibilidade. Relativamente às tensões pós-fissuradas observou-se um aumento significativo com o aumento da quantidade de fibras. Na realidade, um incremento de 15 kg/m^3 de fibras conduziu a um aumento das resistências residuais entre 2 a 7 vezes, dependendo do valor da abertura de fenda para o qual as tensões são calculadas. Este aumento não pode ser simplesmente atribuído ao maior número de fibras na superfície de fractura verificado para Cf45, visto haver outros factores que contribuíram para a eficiência do reforço das fibras. De entre estes factores, convém salientar o modo predominante de arrancamento das fibras, como previamente referido, observou-se rompimento das fibras para a série Cf30, enquanto para Cf45 o modo principal de rotura foi o arrancamento completo da fibra.

Quadro 2. Parâmetros de fractura obtidos dos ensaios de tracção uniaxial.

Cf [kg/m^3]		σ_{peak}	$\sigma_{0.3mm}$	σ_{1mm}	σ_{2mm}	G_{F1mm}	G_{F2mm}
		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
30	Avg.	3.392	0.649	0.520	0.186	0.685	1.007
	CoV	13.0%	36.6%	45.1%	22.8%	32.3%	33.7%
	$k_{95\%}$	3.024	0.450	0.324	0.250	0.500	0.724
45	Avg.	3.019	1.219	1.466	1.342	1.342	2.645
	CoV	9.9%	18.0%	12.7%	18.0%	13.6%	13.1%
	$k_{95\%}$	2.768	1.036	1.310	0.972	1.189	2.356

No que concerne à energia dissipada, G_F , para Cf45 observou-se, igualmente, um aumento significativo de 2 a 2.6 vezes, respectivamente, para aberturas de fenda de 1 e 2 mm. Os valores dos coeficientes de variação, CoV, observados para a série Cf45 foram consideravelmente inferiores aos

de Cf30. Numa primeira análise, os valores do CoV podem parecer bastante elevados, contudo esta ordem de grandeza é perfeitamente espectável para este tipo de material compósito. Na realidade, os valores obtidos para os CoV dos referidos parâmetros foram inferiores aos reportados por outros investigadores para betões convencionais reforçados com fibras, utilizando o mesmo esquema de ensaio e dimensões de provetes [10, 11].

Uma análise e discussão mais detalhada dos resultados obtidos, suportada no número de fibras totais e efectivas presentes na secção de fractura, pode ser encontrada em [2, 12].

5. COMPORTAMENTO MECÂNICO À TRACÇÃO EM FLEXÃO

5.1 Relação força – deformação (F - δ)

Nas Figuras 5 e 6 incluem-se as repostas força – deslocamento a meio vão para as séries Cf30 e Cf45, respectivamente. Uma ilustração mais detalhada da parte inicial da resposta, até uma deformação de 3 mm, é incluída na parte direita das referidas figuras. Adicionalmente, são também representadas as curvas médias e características para os L.I. e L.S. para um intervalo de confiança de $k = 95\%$.

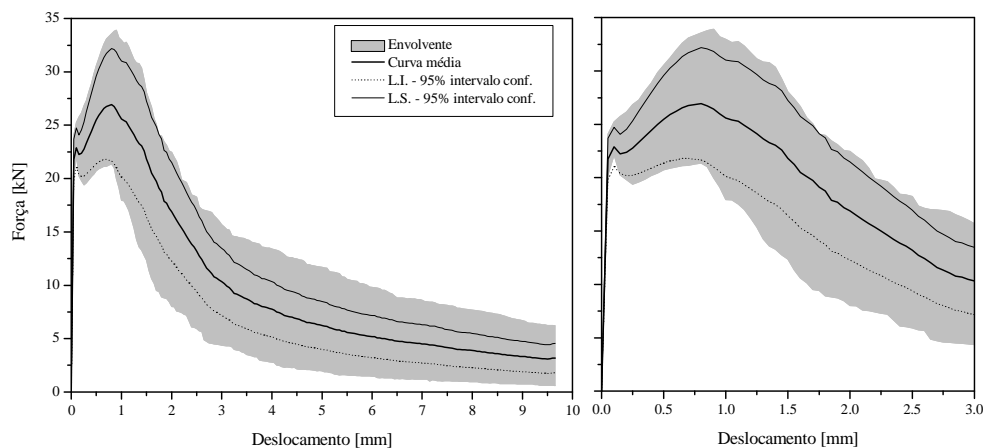


Figura 5. Relação força – deslocamento a meio-vão, para a série Cf30.

Relativamente ao comportamento do pré-pico da série Cf30, após a força correspondente ao limite de proporcionalidade ser atingida, foi observado uma ténue diminuição da força imediatamente seguido de um endurecimento em flexão, até uma deformação aproximada de 1 mm, devido à mobilização dos mecanismos de reforço das fibras. Por sua vez, na série Cf45, não foi observado um decréscimo de força após o limite de proporcionalidade ser atingido. Devido à maior quantidade de fibras nesta composição, um comportamento vincadamente não-linear é observado anteriormente à força máxima.

Após a força máxima ser atingida, são observados dois comportamentos distintos para cada uma das séries estudadas. Em Cf30, a força decresce consideravelmente, enquanto em Cf45 observa-se um patamar até uma deformação de 1.5 mm. Relativamente à série Cf30, o comportamento observado poderá ser atribuído ao rompimento das fibras, também observado nos ensaios à tracção uniaxial na série correspondente, e previamente constatado nos ensaios de micro-mecânicos efectuados a este tipo de fibras. No ensaios à flexão, contrariamente ao ensaio à tracção, a abertura de fenda varia ao longo do plano da fenda, por esta razão as fibras posicionadas ao longo da altura da viga irão ser mobilizadas em fases distintas consoante o seu posicionamento relativamente ao eixo neutro. As fibras mais distantes do eixo neutro possuem uma maior probabilidade de romperem primeiro. Para uma deformação de 1 mm tem-se uma abertura de fenda na boca do entalhe aproximadamente idêntica, na realidade ligeiramente superior [2]. Tendo em linha de consideração, que a fractura de fibras ocorreu para deslizamentos inferiores a 1mm, as fibras mais próximas da face inferior da viga começam a romper. Por uma questão de simplicidade de raciocínio, admitindo-se que o deslizamento é aproximadamente igual à abertura de fenda. Então, quando as fibras começam a fracturar (as mais

próximas da face inferior da viga), a diminuição da força residual começa a acentuar-se. Dado que parte da energia libertada, durante o processo de fractura das fibras, irá ser transferida para as restantes fibras activas, isto irá acelerar rapidamente o processo de arrancamento das fibras posicionadas imediatamente acima. Por outro lado, a diminuição menos acentuada da força na série Cf45, pode ser justificada com a maior quantidade de fibras desta série, assim como o menor número de fibras que eventualmente tenha fracturado. Estes dois factores contribuirão igualmente para uma menor dispersão das respostas força - deformação.

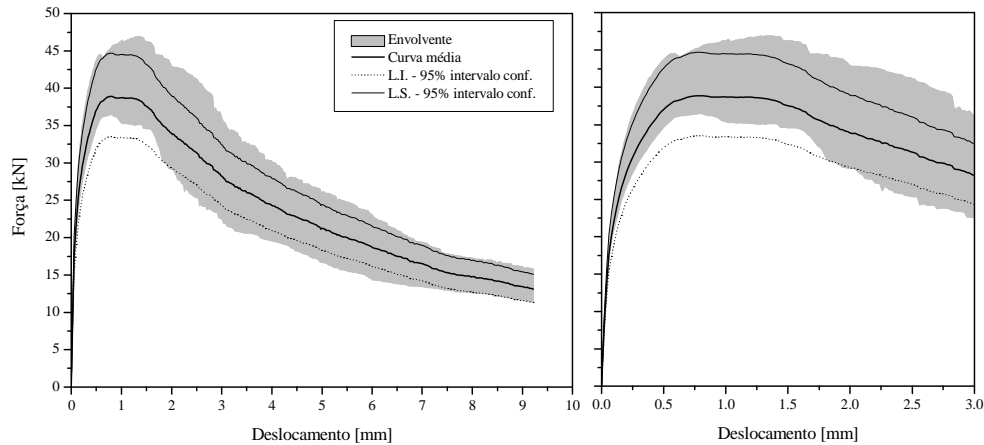


Figura 6. Relação força – deslocamento a meio-vão, para a série Cf45.

5.2 Tensões residuais e equivalentes à tracção em flexão

O Quadro 3 inclui os valores médios e característicos dos parâmetros relativos ao comportamento pós-pico obtido nos ensaios à flexão de três pontos. As resistências equivalentes, f_{eq} , e resistências residuais, f_R , foram determinadas de acordo com o preconizado em [6].

Quadro 3. Resultados experimentais obtidos nos ensaios à flexão de três pontos.

C_f [kg/m ³]		F_L [kN]	δ_L [mm]	$f_{ct,L}$ [MPa]	$f_{eq,2}$ [MPa]	$f_{eq,3}$ [MPa]	$f_{R,1}$ [MPa]	$f_{R,4}$ [MPa]
30	Avg.	21.76	0.050	6.96	8.00	6.66	8.00	3.32
	CoV	7.2%	0%	7.2%	18.7%	25.2%	17.6%	47.3%
	$k_{95\%}$	19.80	0.050	6.34	6.14	4.58	6.25	1.37
45	Avg.	17.66	0.050	5.65	10.84	11.33	11.64	9.03
	CoV	3.8%	0%	3.8%	10.7%	13.1%	10.4%	19.0%
	$k_{95\%}$	16.84	0.050	5.39	9.40	9.49	10.14	6.90

Relativamente ao limite de proporcionalidade, $f_{ct,L}$, o qual corresponde ao fim da fase linear elástica, i.e. ao início da fendilhação, foi observado um decréscimo de cerca 19 % com o aumento de fibras. Este decréscimo era espectável, visto que nos ensaios de tracção uniaxial constatou-se uma diminuição da resistência à tracção em Cf45, devido às diferenças nas composições utilizadas no fabrico do betão das duas séries.

As resistências equivalentes e residuais aumentaram significativamente com o aumento da quantidade de fibras. Relativamente às resistências $f_{eq,2}$ e $f_{R,1}$, as quais estão associadas aos estados limites de utilização, aumentaram com a quantidade de fibras 35 e 45 %, respectivamente. Por outro lado, para as resistências $f_{eq,3}$ e $f_{R,4}$, correspondendo aos estados limites últimos, constatou-se um aumento ainda mais significativo com o aumento da quantidade de fibras, respectivamente, 70 e 172 %. Para $f_{eq,2}$ e $f_{R,1}$ o incremento observado com a quantidade de fibras pode ser simplesmente atribuído ao maior número de fibras que intersectam a fenda, visto que em Cf45 existem cerca de 35 % mais fibras a intersectarem o plano da fenda [2]. Este incremento no número de fibras activas na fenda encontra-se dentro do intervalo do aumento verificado para $f_{eq,2}$ e $f_{R,1}$. Pelo contrário, o aumento observado para $f_{eq,3}$ e $f_{R,4}$ já não pode ser justificado, exclusivamente, com o aumento do número de fibras que

intersectam a fenda. Mais uma vez, em similitude ao observado no comportamento mecânico à tracção uniaxial, isto deve-se ao distinto comportamento micro-mecânico das fibras para cada uma das séries, i.e. rompimento das fibras para Cf30 e arrancamento para a série Cf45. Dado que as resistências $f_{eq,3}$ e $f_{R,4}$ são avaliadas para deformações mais elevadas, conseqüentemente, aberturas de fenda mais elevadas, a posição do eixo neutro encontrar-se-á muito próxima do face superior da viga. Mesmo a abertura de fenda variando do eixo neutro até à face inferior da viga existirá uma parcela significativa da secção transversal ($\approx 60\%$), com uma abertura de fenda superior a 1 mm para uma deformação a meio-vão correspondente a 2.85 mm (equivalente à média da deformação para qual são avaliadas $f_{eq,3}$ e $f_{R,4}$) [2]. Então, existe uma elevada probabilidade das fibras terem rompido, numa parcela significativa da secção transversal, para a série Cf30. Convém salientar, que esta justificação deve ser encarada de forma qualitativa, dado ser simplista. Pois a percentagem de fibras que romperão está intimamente ligada à inclinação das fibras relativamente ao plano da fenda, i.e. à direcção das tensões de tracção. Adicionalmente para estes provetes prismáticos foi observado um coeficiente de orientação superior ao observado para provetes uniaxiais (pode ser encarado como um alinhamento preferencial das fibras relativamente ao eixo normal da fenda) [2].

A análise e discussão mais detalhada dos resultados obtidos, suportada no número de fibras totais e efectivas presentes na secção de fractura, pode ser encontrada em [2].

6. CONCLUSÕES

No presente artigo são apresentados os resultados experimentais do comportamento mecânico em tracção uniaxial e em flexão de BACRFA, para duas séries com diferentes percentagens volumétricas de fibras, uma com 0,38% e outra com 0,57%.

Como seria espectável, foi observado uma significativa melhoria do comportamento mecânico com o incremento da quantidade de fibras, quer em tracção quer em flexão. Relativamente ao comportamento em tracção uniaxial, constatou-se que um incremento de 15 kg/m^3 de fibras conduziu a um aumento das resistências residuais entre 2 a 7 vezes, dependendo do valor da abertura de fenda para o qual as tensões são calculadas. Por outro lado, em flexão, observou-se que as resistências $f_{eq,2}$ e $f_{R,1}$, as quais estão associadas aos estados limites de utilização, aumentaram com a quantidade de fibras entre 35 e 45 %, respectivamente. Para as resistências $f_{eq,3}$ e $f_{R,4}$, correspondendo aos estados limites últimos constatou-se um aumento ainda mais significativo com o aumento da quantidade de fibras, respectivamente, 70 e 172 %.

O modo de rotura das fibras, resistência e rigidez da matriz, assim como o número efectivo de fibras na superfície de fractura, justificou o pseudo-endurecimento observado no comportamento pós-pico do BACRFA da série com uma percentagem volumétrica de fibras de 0.57 %; bem como o decréscimo acentuado da resistência residual do BACRFA, na série com uma percentagem volumétrica de 0,38%. Para esta última série, o modo rotura predominante foi o rompimento das fibras, enquanto para a série com uma maior percentagem de fibras predominou o arrancamento completo das fibras, conduzindo desta forma a resistências residuais e energias dissipadas superiores.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam agradecer o apoio concedido pela companhia Civitest na execução dos provetes. O primeiro autor deseja igualmente agradecer a bolsa de doutoramento SFRH/BD/18002/2004 concedida pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, FCT.

REFERÊNCIAS

- [1] ACI 544 - State-of-the-art report on fiber reinforced concrete (ACI 544.1R). American Concrete Institute, USA. pp. 66 (1996).
- [2] CUNHA, V.M.C.F. - Steel Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete – from Micromechanics to Composite behaviour. Dissertação de doutoramento, Universidade do Minho (submetida).
- [3] SHAH, S. P. e FERRARA, L. - Self consolidating fiber reinforced concrete. Sevnth. Intl. RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concrete: Design and Applications. pp. 641-659 (2008).
- [4] PEREIRA, E.B. [et al.] - Steel fiber reinforced self-compacting concrete – experimental research and numerical simulation. Journal of Structural Engineering. 134: 8, pp. 1310-1321 (2008).
- [5] RILEM TC 162-TDF - Test and design methods for steel fibre reinforced concretes: Uniaxial tension test for steel fibre reinforced concrete. Journal of Materials and Structures. 34, pp. 3-6 (2001).
- [6] RILEM TC 162-TDF - Test and design methods for steel fibre reinforced concrete - bending test (final recommendation). Journal of Materials and Structures. 35:253. pp. 579-582 (2002).
- [7] STROEVEN, P. e HU, J. - Effectivness near boundaries of fibre reinforcement in concrete. Materials and Structures. 39, pp. 1001-1013 (2006).
- [8] SOROUSHIAN, P. e LEE, C. D. - Distribution and orientation of fibers in steel fiber reinforced concrete. ACI Materials Journal. 87:5, pp. 433-439 (1990).
- [9] MONTEGOMERY, D.C. e RUNGER, G.C. - Applied statistics and probability for engineers. John Wiley & Sons, Inc., Ney York, USA. 1024 pp (1994).
- [10] BARRAGAN, B. E. - Failure and Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete under Tension and Shear. Dissertação de Doutoramento, Universitat Politecnica de Catalunya, Barcelona, Espanha, 272 pp (2002).
- [11] LÄOFGREN, I. [et al.] - The WST method, a fracture mechanics test method for FRC. Materials and Structures. 41. pp. 197-211 (2008).
- [12] CUNHA, V.M.C.F. [et al.] – Tensile behavior of steel fiber reinforced self-compacting concrete. ACI 544-SP, Special Publication – Fiber Reinforced Self-Consolidating Concrete - Research and Applications, American Concrete Institute. (aceite para publicação em 15/01/2010).