

COMPORTAMENTO A LONGO PRAZO DE BETÃO REFORÇADO COM FIBRAS FENDILHADO SUJEITO A FLEXÃO



Cristina Frazão

Eng.^a Civil
CiviTest
VN de Famalicão
cristinafrazao@civitest.com



Felipe Melo

Estudante de
doutoramento
ISISE/UMinho
Guimarães
fjsalomao@gmail.com



Christoph de Sousa

Eng.^o Civil
CiviTest
VN de Famalicão
christophdesousa@civitest.com



Inês Costa

Eng.^a Civil
CiviTest
VN de Famalicão
inescosta@civitest.com



Joaquim Barros

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

SUMÁRIO

O comportamento do betão reforçado com fibras em fluência por flexão é ainda um assunto de conhecimento relativamente escasso, visto que depende de diversos fatores, nomeadamente, do tipo de fibra, do nível de abertura de fenda, dos níveis de carga aplicada, das condições ambientais, da aderência das fibras à matriz do betão e do comportamento de arranque das fibras da matriz sob fluência.

No presente trabalho avalia-se o comportamento à flexão a longo prazo de vigas pré-fendilhadas de betão reforçado com fibras de aço (BRFA) e polipropileno (BRFPP) submetidas a um carregamento constante, para determinação da abertura máxima admissível em condições de serviço, sem ocorrência de fluência em fase terciária. Para tal, foram efetuados ensaios de fluência em flexão com vigas pré-fendilhadas para diferentes níveis de abertura de fissura, tendo-se monitorizado a abertura de fenda ao longo do tempo. Para avaliar o efeito da pré-fendilhação e o tipo de carregamento no comportamento em flexão destes BRF, foram ainda efetuados ensaios do mesmo tipo, mas sob carregamento monotónico. Os ensaios de fluência foram executados segundo as recomendações da RILEM TC 261-CCF, tendo-se adotado as seguintes relações pré-abertura de fenda/nível de carregamento constante (% da força correspondente à abertura de fenda implementada): 0.4mm/65% e 0.9mm/50% em vigas de BRFA; 0.2mm/65% e 0.4mm/50% em vigas de BRFPP. Para os níveis de pré-fendilhação e carregamento constante considerados, os resultados experimentais revelaram que o comportamento pós-fendilhação do BRFA e do BRFPP não é afetado pela fluência.

Palavras-chave: Betão reforçado com fibras, fluência, flexão, abertura de fenda, resistência residual.

1. INTRODUÇÃO

O interesse pelo conhecimento do comportamento a longo prazo do betão reforçado com fibras (BRF) em estado fendilhado tem aumentado significativamente nos últimos anos. Diversas metodologias de ensaio têm sido desenvolvidas envolvendo distintas configurações de carregamento, tipologias e dimensões de provetes. O ensaio de fluência em flexão com provetes prismáticos pré-fendilhados tem sido o mais usado, monitorizando-se a evolução da abertura da pré-fenda ao longo do tempo sob carregamento constante [1]. Apesar de diversos investigadores terem realizado estudos neste âmbito, a influência dos principais parâmetros que regem o comportamento em fluência, nomeadamente, o nível de força aplicada em fluência, a abertura de fenda no início do ensaio a longo prazo, a temperatura e a humidade ambiente, assim como, a aderência das fibras na matriz do betão e o comportamento de arranque das fibras da matriz sob fluência, que condiciona a propagação da abertura de fenda quando o betão está sujeito a carregamento constante, ainda não está totalmente compreendida e necessita de ser mais investigada [1, 2].

No geral, tem-se constatado que a abertura de fenda sob carregamento constante é mais rápida e intensa no BRFP do que no BRFA [3]. Para níveis de carregamento semelhantes em flexão, o coeficiente de fluência obtido em vigas de BRFP pré-fendilhadas com abertura de fenda inferior a 1.50 mm poderá ser o dobro do obtido em BRFA [4]. O aumento da abertura de fenda devido à fluência por flexão nas vigas de BRFP poderá ser 6 a 10 vezes superior ao das vigas de BRFA [4], o que poderá ser devido ao dano mais intenso na interface fibra-matriz no BRFP para a mesma pré-abertura de fenda, e à maior fluência da fibra plástica.

2. COMPOSIÇÕES E CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO À COMPRESSÃO DOS BETÕES

Fibras de aço com extremidades dobradas foram utilizadas na produção do BRFA. Estas fibras têm com comprimento de 60 mm, diâmetro de 0.75 mm, esbelteza de 80 e uma resistência à tração de 1100 MPa. Na produção do BRFP foram utilizadas macrofibras de polipropileno de forma reta com uma seção transversal trilobal e 54 mm de comprimento, 0.69 mm de diâmetro equivalente, 425 MPa de resistência à tração e 11.4 GPa de módulo de elasticidade. Adicionalmente, e para efeitos de análise e comparação de resultados, foi produzida uma mistura de BRFA com adição de microfibras de polipropileno com 12 mm de comprimento (BRFP) para explorar a eventual influência da incorporação de microfibras PP no comportamento em fluência do BRFA.

As composições das matrizes dos betões foram definidas de modo a obter BRFs com elevada capacidade de fluidez e contorno de obstáculos no estado fresco, sem ocorrência de segregação dos constituintes, assim como, com elevado desempenho mecânico em compressão e à tração por flexão no estado endurecido, nomeadamente, ao nível da resistência residual e da capacidade de absorção de energia após o início da fendilhação. As composições dos BRFs são constituídas por cimento Portland CEM I 42.5R, filler calcário, três tipos de agregados (areia fina, meia areia e brita), água e superplastificante MasterGlenium

SKY 617 da BASF (SP). Na produção do BRFA utilizou-se uma dosagem de 60 kg/m³ de fibras de aço, enquanto na produção do BRFPF foi utilizada uma dosagem de 6 kg/m³ de fibras de polipropileno. Na produção do BRFPF, para além dos 60 kg/m³ de fibras de aço incluiu-se 2 kg/m³ de microfibras de polipropileno. No Quadro 1 apresenta-se a dosagem de cada componente por m³ para os 3 BRF, representado A/C a razão água/cimento.

Quadro 1. Composições dos betões por m³

Betão	CEM I 42.5R	Fíler calcário	Areia fina	½ Areia	Brita	Água	SP	Fibras	A/C
	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[dm ³]	[dm ³]	[kg]	
BRFA	413	353	179	656	589	183	8	60 (aço)	0.44
BRFPF	413	353	179	653	586	183	8	60+2 (aço+PP)	0.44
BRFPF	420	219	250	690	630	167	10	6 (PP)	0.40

Os BRF apresentaram consistência fluída, sendo o BRFA e o BRFPF de classe de consistência S5 e o BRFPF de classe de consistência S4, segundo a norma EN 206 (2013) + A2 (2021) [5].

O comportamento à compressão dos betões foi avaliado através de ensaios em cilindros de Ø150 x 300 mm, sendo a resistência à compressão e o módulo de elasticidade determinados de acordo com a norma NP EN 12390-3 [6] e NP EN 12390-13 [7], respetivamente. Os ensaios de compressão foram realizados a duas idades, nomeadamente no início dos ensaios de fluência (28 dias) e após a execução dos ensaios de fluência. No Quadro 3 apresentam-se os valores médios, os correspondentes valores do desvio padrão (DP) e do coeficiente de variação (CoV), a massa específica do betão, γ , o módulo de elasticidade, E_c , e a resistência à compressão, f_c .

Quadro 2. Resultados dos ensaios de compressão realizados em provetes cilíndricos.

Betão	Idade [dias]		γ [Kg/m ³]	E_c [GPa]	f_c [MPa]	Idade [dias]		γ [Kg/m ³]	E_c [GPa]	f_c [MPa]
		Média					Média			
BRFA	28	Média	2312(4*)	26.8(3*)	60.8(4*)	142	Média	2331(4*)	28.6(4*)	64.9(4*)
		DP	43	0.5	1.1		DP	10	0.6	1.7
		CoV (%)	1.87	1.93	1.82		CoV (%)	0.43	2.12	2.56
BRFPF	28	Média	2354(4*)	28.4(4*)	59.9(4*)	119	Média	2347(*4)	30.5(*4)	66.3(*4)
		DP	14	0.7	1.0		DP	13	0.5	1.6
		CoV (%)	0.58	2.34	1.65		CoV (%)	0.55	1.55	2.39
BRFPF	28	Média	2303(4*)	29.2(4*)	59.1(1*)	106	Média	2299(*4)	30.2(*4)	64.1(*4)
		DP	4	0.3	-		DP	4	2.0	1.5
		CoV (%)	0.16	0.94	-		CoV (%)	0.19	6.54	2.39

*Número de provetes

De acordo com a EN 206:2013+A2 (2021) [5], os BRF desenvolvidos são da classe de resistência C50/60.

3. COMPORTAMENTO À FLEXÃO A LONGO PRAZO DOS BRF EM ESTADO FENDILHADO

Para a avaliação do comportamento dos BRF em fluência por flexão adotou-se um procedimento de ensaio baseado na metodologia desenvolvida por Arango et al. [8]. Nos ensaios realizados pretendeu-se avaliar o comportamento à flexão a longo prazo de vigas de 600x150x150 mm³ pré-fendilhadas quando submetidas a um carregamento constante. A influência do nível de abertura de fissura aquando do carregamento de fluência foi avaliado através de ensaios com vigas onde foram induzidas pré-abertura de fissura (W_{cr}) de diferente valor, nomeadamente $W_{cr} = 0.2$ mm (3 vigas BRFP), $W_{cr} = 0.4$ mm (3 vigas de BRFA, BRFP e BRFP) e $W_{cr} = 0.9$ mm (3 vigas BRFA e BRFP). Nas vigas de BRFA e BRFP foram adotados dois níveis de carregamento constante, nomeadamente 65% e 50% da força correspondente à abertura de fenda de 0.4 mm e 0.9 mm, respetivamente. Para as vigas de BRFP foram adotados níveis de carregamento de 65% e 50% da força correspondente à abertura de fenda de 0.2 mm e 0.4 mm, respetivamente. No caso do BRFP optou-se por aberturas de fenda inferiores às adotadas no BRFA e BRFP, visto que, de acordo com a literatura, há tendência para os BRFP desenvolverem maior fluência devido às características geométricas e mecânicas das fibras de polipropileno [3,4].

Dois grupos de ensaios à flexão sob 4 pontos de carga foram incluídos para obtenção das curvas força vs. abertura de fenda: numa primeira fase, ensaios em que o carregamento foi monotónico para determinação do valor da resistência à flexão, e numa segunda fase, ensaios em que o carregamento foi constante de forma a avaliar a evolução da abertura de fenda ao longo do tempo (ensaio de fluência).

3.1 Ensaios monotónicos de flexão

Os ensaios monotónicos de flexão sob 4 pontos de carga foram realizados aos 28 dias em 6 vigas entalhadas de cada tipo de BRF, de acordo com as recomendações da EN 14651 (2005) + A1 (2007) [9] e conforme apresentado na Figura 1. Embora a norma preveja a execução dos ensaios sob 3 pontos de carga, neste caso optou-se pela execução sob 4 pontos devido às características do bastidor de fluência a ser utilizado. Na Figura 2 apresentam-se, as curvas Força-CMOD (*crack mouth opening displacement*) registadas. No Quadro 3 apresentam-se os valores médios e os correspondentes valores do desvio padrão e do coeficiente de variação (CoV) dos parâmetros das resistências residuais à tração por flexão, $f_{ct,L}^f$, $f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$ e $f_{R,4}$, cujo significado físico e procedimento de obtenção se encontram descritos em [9]. Adicionalmente apresentam-se também no Quadro 3, os valores característicos das resistências residuais à tração por flexão, e a correspondente classe de tenacidade definida de acordo com o *fib* Model Code 2010 (MC2010) [10].

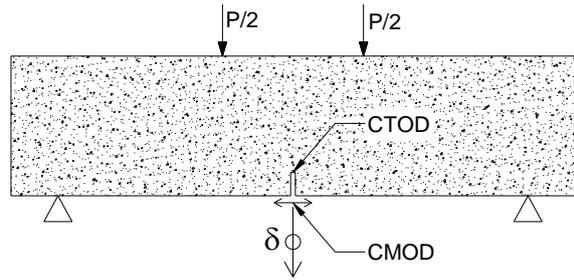
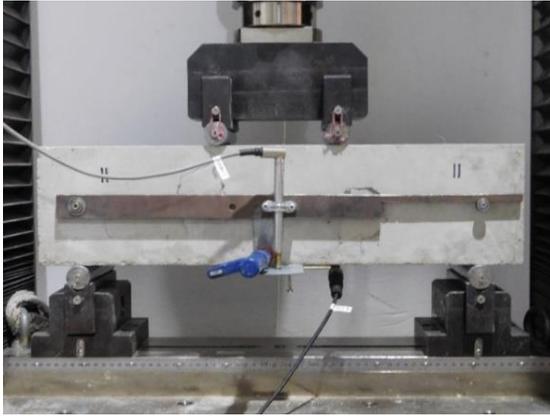
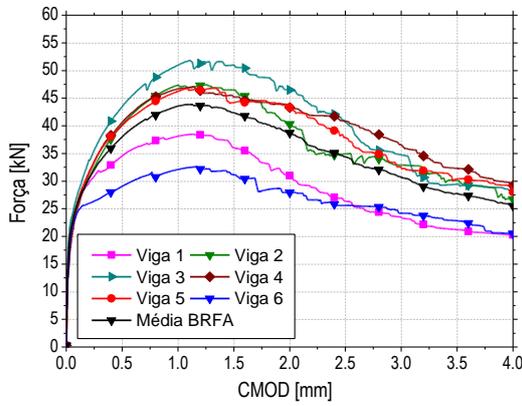
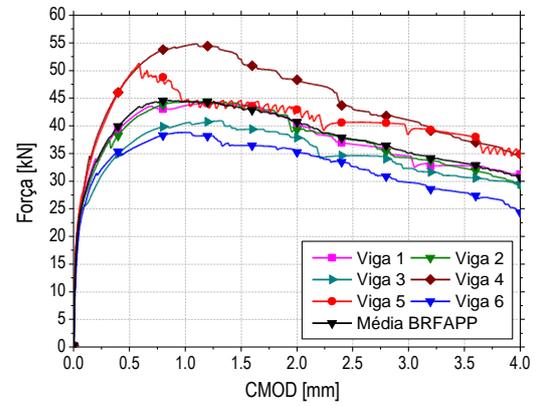


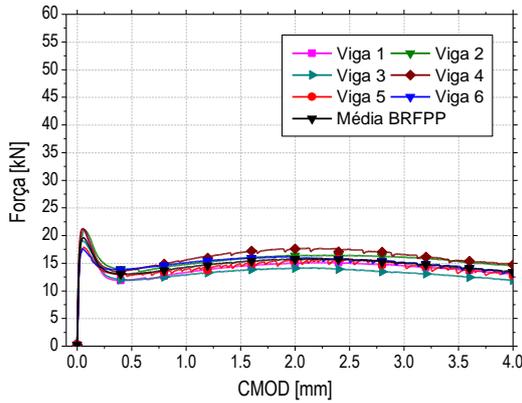
Figura 1. Procedimento de ensaio de flexão de vigas sob 4 pontos



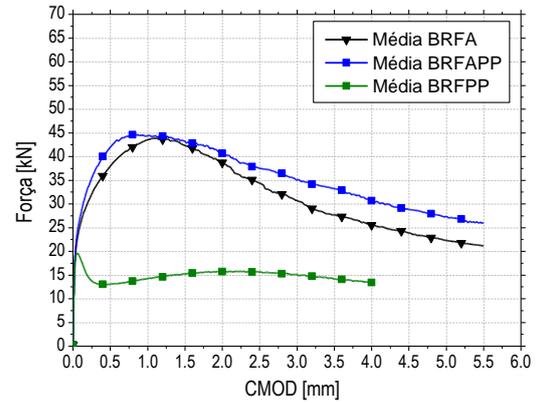
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2. Relações Força vs. CMOD obtidas nos ensaios monotônicos de flexão sob 4 pontos com vigas de: (a) BRFA (28 dias); (b) BRFAPP (28 dias); (c) BRFPP (28 dias); (d) comparação das curvas médias para os 3 BRF

Quadro 3. Parâmetros das resistências residuais à tração por flexão (valores médios e característicos) avaliados aos 28 dias de acordo com a EN 14651 (2005) + A1 (2007) [9]

Betão		$f_{ct,L}^f$ [MPa]	$f_{R,1}$ [MPa]	$f_{R,2}$ [MPa]	$f_{R,3}$ [MPa]	$f_{R,4}$ [MPa]	Classificação (MC2010)
BRFA	Média	4.86	8.42	9.39	7.62	6.15	6b
	DP	0.28	1.17	1.63	1.52	1.01	
	CoV (%)	5.84	13.85	17.38	19.91	16.48	
	Característico	4.36	6.36	6.50	4.93	4.35	
BRFAPP	Média	5.09	9.29	9.58	8.31	7.36	7c
	DP	0.25	1.30	1.18	0.85	0.88	
	CoV (%)	4.88	14.02	12.32	10.23	12.00	
	Característico	4.65	6.98	7.49	6.80	5.79	
BRFPP	Média	4.38	2.94	3.43	3.51	3.18	2d
	DP	0.38	0.20	0.25	0.27	0.25	
	CoV (%)	8.73	6.97	7.29	7.81	7.82	
	Característico	3.70	2.57	2.99	3.02	2.74	

Dos resultados apresentados verifica-se que as fibras de aço adotadas proporcionaram $f_{R,i}$ superiores aos garantidos pelas fibras PP consideradas, apesar da menor dispersão de resultados nos BRFP, o que estará relacionado com o maior número de fibras por unidade de volume de betão. A adição de microfibras de polipropileno ao BRFA (BRFAPP) resultou num ligeiro melhor comportamento pós-fendilhação do BRFA.

3.2 Ensaios de fluência por flexão

Os ensaios de fluência por flexão foram realizados em 3 fases: primeiro foi executada a pré-fendilhação da viga, de seguida procedeu-se ao ensaio de fluência em flexão na viga pré-fendilhada até estabilização da abertura de fenda, e por fim executou-se o ensaio de flexão pós-fluência da viga até à sua rotura sob carregamento monotónico.

3.2.1 Pré-fendilhação das vigas

Para executar a fenda, as vigas foram sujeitas a um carregamento em flexão sob 4 pontos de carga aos 28 dias de idade, de acordo com a configuração de ensaio apresentado na Figura 1, controlando a abertura de fenda com o LVDT localizado na face inferior da viga até atingir o valor pretendido correspondente à abertura de fenda final de 0.2, 0.4 ou 0.9 mm na boca do entalhe (CTOD), após o qual se procede à descarga do provete. Na Figura 3 apresenta-se um gráfico esquemático do processo de pré-fendilhação das vigas, onde F_{cr} é a força correspondente à abertura de fenda que se pretende atingir (W_{cr}) e W_{cr}^{res} é a abertura de fenda residual após descarregamento da viga.

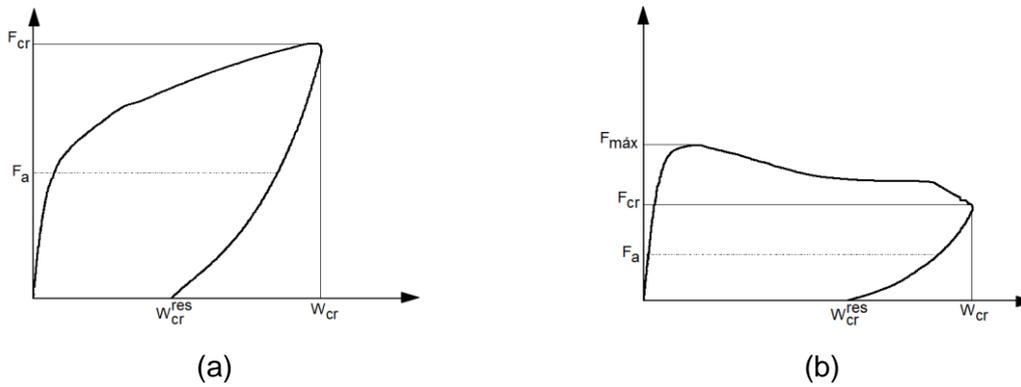


Figura 3. Esquema representativo do processo de pré-fissuração das vigas de: (a) BRFA e BRFAPP; (b) BRFPP

Nos Quadros 4 e 5 apresentam-se os parâmetros do processo de pré-fendilhação das vigas, nomeadamente, a força máxima aplicada, $F_{máx}$, a força F_{cr} correspondente à abertura de fenda implementada, W_{cr} e a força F_a a aplicar na fase de fluência nas vigas pré-fendilhadas.

Quadro 4. Parâmetros do processo de pré-fendilhação das vigas de BRFA e BRFAPP e força aplicada na fase de fluência das vigas pré-fendilhadas

Betão		$F_{máx} = F_{cr}$ [kN]	W_{cr} [mm]	F_a [kN]
BRFA	Média (V7,V8,V9)	35.02	0.352	22.76 (65% F_{cr})
	DP	6.73	0.001	4.38
	CoV (%)	19.23	0.38	19.23
	Média (V10,V11,V12)	46.01	0.851	23.01 (50% F_{cr})
	DP	3.07	0.004	1.54
	CoV (%)	6.68	0.47	6.68
BRFAPP	Média (V7,V8,V9)	41.11	0.361	26.72 (65% F_{cr})
	DP	1.77	0.004	1.15
	CoV (%)	4.31	1.02	4.31
	Média (V10,V11,V12)	44.86	0.860	22.43 (50% F_{cr})
	DP	0.93	0.010	0.46
	CoV (%)	2.07	1.33	2.07

Quadro 5. Parâmetros do processo de pré-fendilhação das vigas de BRFPP e força aplicada na fase de fluência das vigas pré-fendilhadas

Betão		$F_{máx}$ [kN]	W_{cr} [mm]	F_{cr} [kN]	$F_{cr} / F_{máx}$ [%]	F_a [kN]
BRFPP	Média (V7,V8,V9)	19.63	0.200	16.65	85	10.82 (65% F_{cr})
	DP	0.85	0.011	1.06	4	0.69
	CoV (%)	4.35	4.28	6.39	5.13	6.39
	Média (V10,V11,V12)	20.78	0.380	14.88	72	7.44 (50% F_{cr})
	DP	0.73	0.009	1.79	9	0.90
	CoV (%)	3.52	2.63	12.06	12.89	12.06

3.2.2 Fluência em flexão das vigas pré-fendilhadas

Após o processo de pré-fendilhação, as vigas foram transferidas para os bastidores de fluência localizados numa câmara climática, com temperatura (20°C) e humidade relativa (60%) controladas. Cada bastidor de fluência em flexão permite submeter simultaneamente 3 vigas sob carga constante, de acordo com a configuração de ensaio apresentada na Figura 4. O ensaio foi realizado sob controlo de força. As vigas foram carregadas através de um atuador hidráulico comandado manualmente, tendo o nível de força pretendido aplicar sido registado por célula de carga, nomeadamente 65% ou 50% da média do F_{cr} das 3 vigas em cada grupo de ensaios. O processo de carregamento das vigas foi executado lentamente e com todo o cuidado de modo a evitar um súbito aumento da força que causasse a rotura das vigas. Para medir a abertura de fenda nas vigas sob carga durante os ensaios de fluência aplicou-se um transdutor de deslocamento (LVDT) na face inferior de cada viga, ao nível do entalhe, conforme usado aquando da execução da pré-fissuração. Todos os LVDTs e as células de carga foram conectados a um sistema de aquisição de dados, configurado para ler e guardar os dados continuamente para determinadas frequências temporais (frequência variável de aquisição desde 10 hz (início do ensaio de fluência) até 0.02 hz (fim do ensaio de fluência)). A força aplicada nas vigas manteve-se constante até a abertura de fenda estabilizar, após o qual se realizou a descarga das vigas. A abertura de fenda foi assumida estabilizada quando a variação da mesma durante 3 dias consecutivos foi menor ou igual a 5 μm . O processo de descarga foi realizado removendo o óleo do atuador hidráulico para o depósito da bomba de óleo. Após o descarregamento das vigas, manteve-se o sistema de aquisição de dados ativo pelo período mínimo de 2 dias para registar o refechamento da abertura de fenda durante o processo de recuperação pós-fluência.



Figura 4. Bastidores de fluência em flexão com vigas pré-fendilhadas

Na Figura 5 apresenta-se esquematicamente as relações abertura de fenda vs. tempo e força vs. abertura de fenda a obter nos ensaios de fluência, onde W_{inst} e W_{lt} correspondem, respetivamente, à abertura de fenda instantânea e a longo prazo durante o carregamento das vigas, W_{inst}^{rec} , W_{lt}^{rec} e W_{total}^{rec} à recuperação instantânea, a longo prazo e total de abertura de

fissura no processo de descarga, respetivamente, W_{lt}^{res} à abertura de fenda residual após a fase de descarga e F_a representa a força aplicada nas vigas durante o ensaio de fluência.

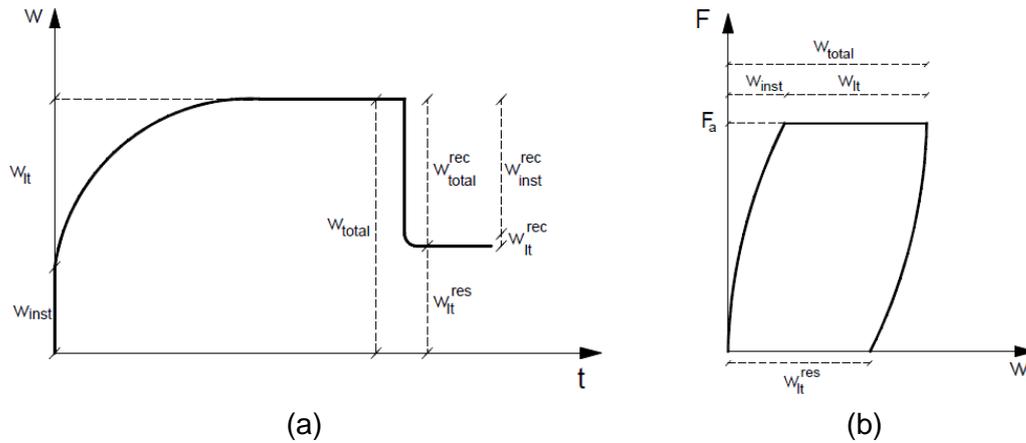


Figura 5. Fluência de vigas pré-fendilhadas: (a) Relação abertura de fenda vs. tempo; (b) Relação Força vs. abertura de fenda [11]

A análise dos resultados obtidos nos ensaios de fluência foi efetuada por comparação com os resultados obtidos por Abrishambaf [11], tendo sido para tal determinados os parâmetros da velocidade de abertura de fenda e o coeficiente de fluência, de acordo com as seguintes expressões:

$$COR_{t_2-t_1} = \frac{W_{lt}^{t_2} - W_{lt}^{t_1}}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

onde $COR_{t_2-t_1}$ corresponde à velocidade de abertura de fenda entre o instante t_2 e t_1 e $W_{lt}^{t_i}$ é a abertura de fenda a longo prazo no instante t_i . A velocidade de abertura da fenda foi determinada de acordo com a equação (1) para os 7, 15, 30 e 60 dias.

$$\phi^c = \frac{W_{lt}}{W_{inst}} \quad (2)$$

$$\phi^o = \frac{W_{lt}}{W_{inst} + W_{cr}^{res}} \quad (3)$$

onde ϕ^c e ϕ^o correspondem, respetivamente, ao coeficiente de fluência na fase de fluência e desde a origem, sendo W_{cr}^{res} a abertura de fenda residual após a descarga das vigas na fase de pré-fendilhação (Figura 3).

Na Figura 6 apresenta-se a relação obtida da velocidade de abertura de fenda e o nível de força aplicada para as aberturas de fenda consideradas (0.2, 0.4 e 0.9 mm). Na Figura 7 apresentam-se as relações obtidas entre o coeficiente de fluência e o nível de força aplicada, na fase de fluência e desde a origem.

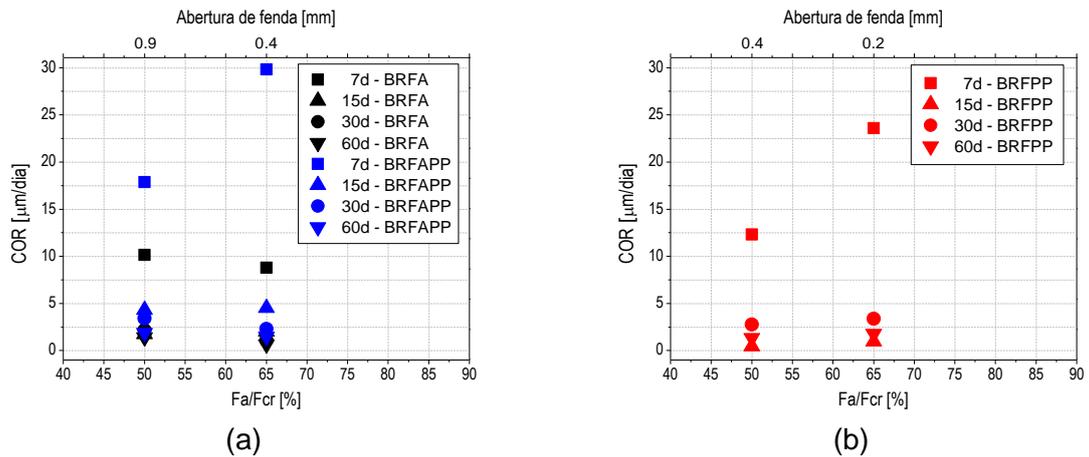


Figura 6. Velocidade de abertura de fenda em função do nível de força aplicada nas vigas de:
 (a) BRFA e BRFAPP com aberturas de fenda de 0.4 e 0.9 mm;
 (b) BRFPP com aberturas de fenda 0.2 e 0.4 mm

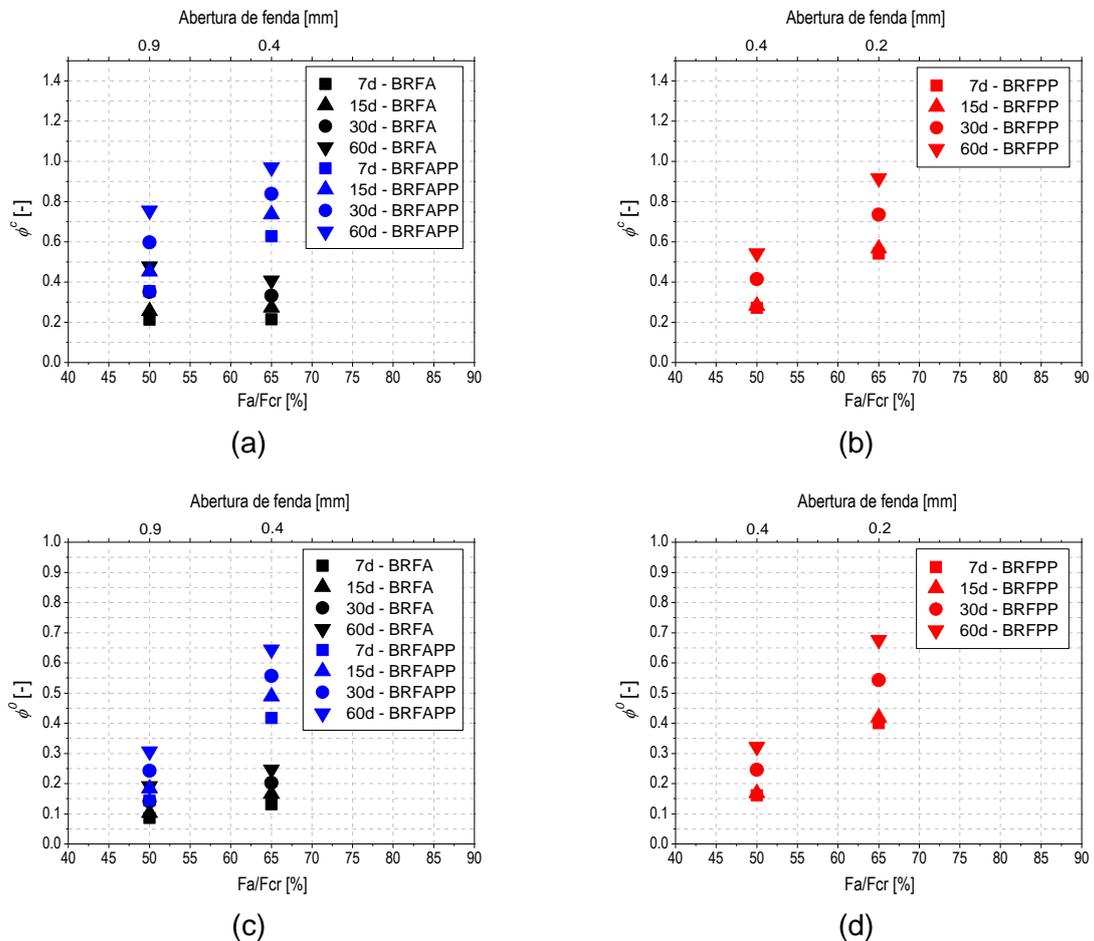


Figura 7. Relação entre o coeficiente de fluência e o nível de força aplicada nas vigas de BRFA, BRFAPP e BRFPP: (a) (b) Na fase de fluência; (c) (d) Desde a origem.

Conforme esperado, com aumento do período em fluência (desde os 7 dias até 60 dias), a velocidade de abertura de fenda diminui enquanto os coeficientes de fluência aumentam. Da análise dos resultados verifica-se que as velocidades de abertura de fenda e os coeficientes

de fluência obtidos foram mais elevados para maior nível de carregamento ($65\% F_{cr}$), que ocorreu para pré-abertura de fissura de 0.4 mm no caso do BRFA e BRFAPP e 0.2 mm no caso do BRFPP. De acordo com as Figuras 5a e 7a,c, a incorporação de microfibras de polipropileno não foi efetiva no melhoramento do comportamento do BRFA em fluência. De acordo com as Figuras 7c,d, os coeficientes de fluência obtidos desde a origem até 60 dias em fluência foram mais elevados no BRFAPP ($W_{cr}=0.4$ e 0.9 mm), seguido no BRFPP ($W_{cr}=0.2$ e 0.4 mm), e mais reduzidos no caso do BRFA.

3.2.3 Ensaios de flexão pós-fluência

Após conclusão dos ensaios de fluência em flexão, as vigas foram submetidas a ensaios monotônicos de flexão sob 4 pontos de carga até à sua rotura, de acordo com o procedimento apresentado na Secção 3.1. Na Figura 8 apresenta-se esquematicamente a curva completa força vs. abertura de fenda expectável ocorrer desde a fase de pré-fissuração até à rotura no ensaio monotónico pós fluência. Nesta figura, K_{sec} é a rigidez durante a fase de retirada da carga de fluência, e $P_p^{máx}$ e $W_p^{máx}$ são a força máxima e a correspondente abertura de fenda registada durante o ensaio monotónico pós-fluência.

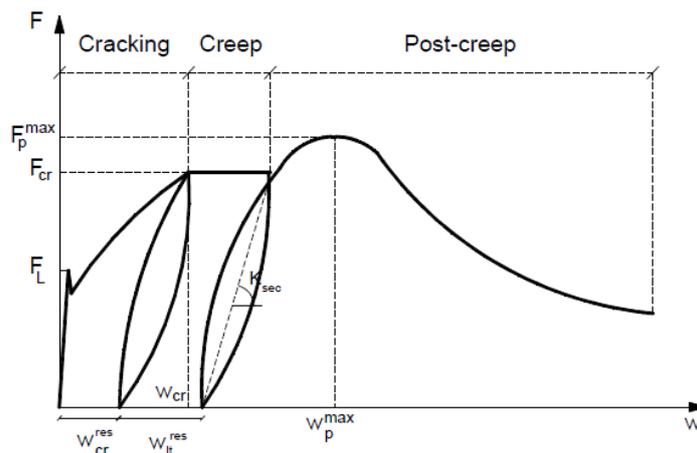


Figura 8. Representação esquemática da relação força vs. abertura de fenda obtida na pré-fissuração, fluência e pós-fluência de vigas pré-fendilhadas [11]

Na Figura 9 apresentam-se as curvas completas força vs. abertura de fenda registadas nas vigas de BRFA, BRFAPP e BRFPP, por comparação com as correspondentes curvas dos ensaios monotônicos de flexão realizados sem fluência.

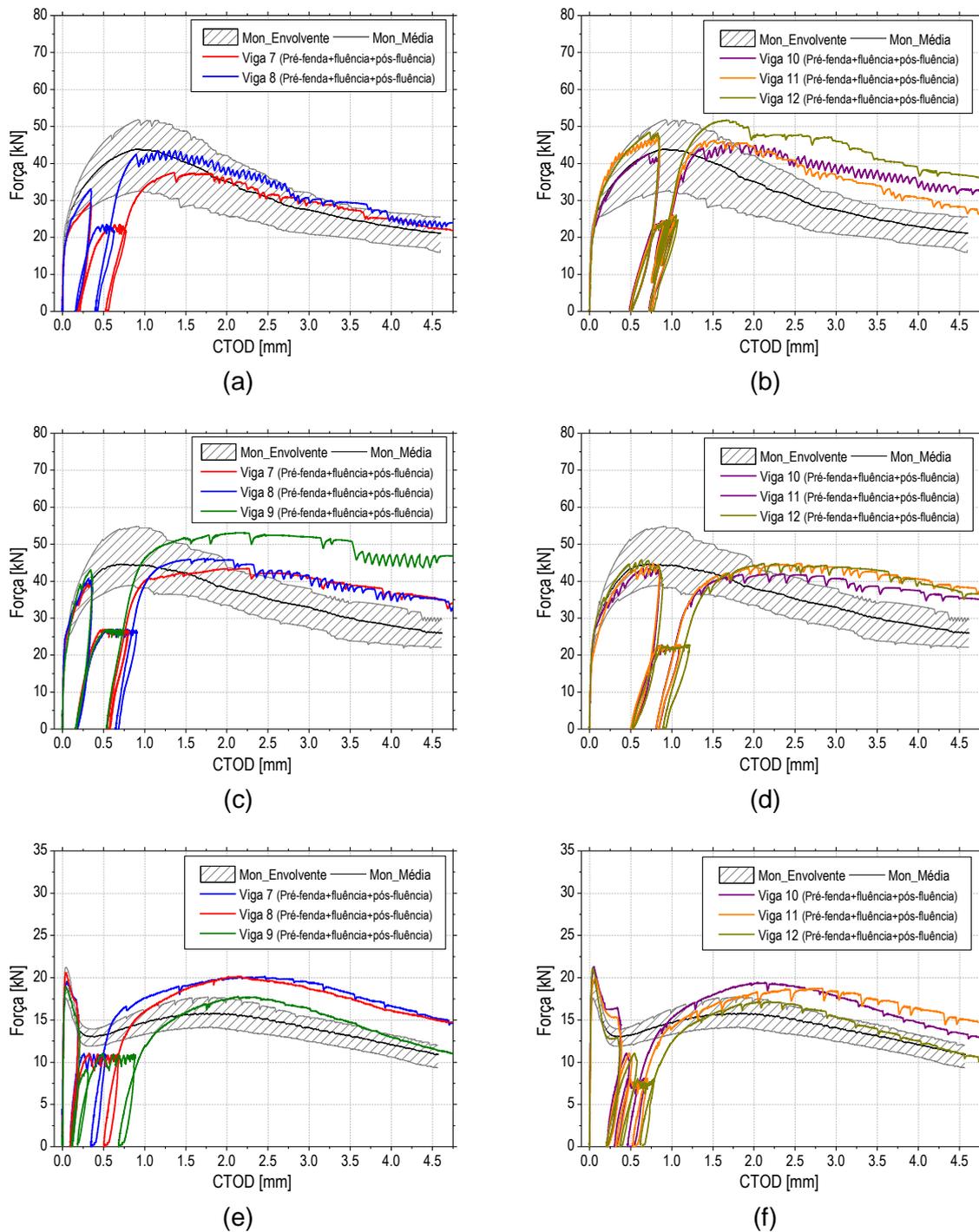


Figura 9. Relações Força vs. CTOD registadas durante os ensaios monotónicos e de fluência das vigas de: (a) BRFA $W_{cr} = 0.4$ mm; (b) BRFA $W_{cr} = 0.9$ mm; (c) BRFAPP $W_{cr} = 0.4$ mm; (d) BRFAPP $W_{cr} = 0.9$ mm; (e) BRFPP $W_{cr} = 0.2$ mm; (c) BRFPP $W_{cr} = 0.4$ mm

Pelos resultados apresentados na Figura 9 verifica-se que o comportamento pós-fendilhação do BRFA e do BRFAPP não foi afetado pela fluência, para uma pré-fendilhação de 0.4 e 0.9 mm, assim como, do BRFPP para uma pré-fendilhação de 0.2 e 0.4 mm.

4. CONCLUSÕES

No âmbito do presente trabalho foram desenvolvidos três betões que aliam as vantagens inerentes à utilização de um BRF, com as que resultam do facto de se tratar de um betão de elevado desempenho com elevada capacidade de fluir, contornar obstáculos e preencher zonas de difícil acesso, sem ocorrência de segregação dos constituintes.

Os resultados experimentais de caracterização do comportamento à flexão a longo prazo de vigas pré-fendilhadas de betão reforçado com 60kg/m³ de fibras de aço (BRFA e BRFAPP) revelaram que o comportamento pós-fendilhação deste betão não é afetado após 60 dias de fluência por flexão, para aberturas de fenda de 0.4 e 0.9 mm sujeitas respetivamente a um nível de carregamento constante médio de 65% e 50% da resistência residual. A incorporação de microfibras de polipropileno na mistura do BRFA (BRFAPP) não foi efetiva no melhoramento do comportamento do BRFA em fluência. No caso do betão reforçado com 6 kg/m³ de macrofibras de polipropileno (BRFPP), também não se observou alteração do comportamento pós-fendilhação deste betão após 60 dias de fluência por flexão, para aberturas de fenda de 0.2 e 0.4 mm sujeitas respetivamente a um nível de carregamento constante médio de 65% e 50% da resistência residual.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto de investigação PreSlabTec (NORTE-01-0247- FEDER-033690) apoiado pela ANI através do Sistema de Incentivos à I&DT Empresarial – Projetos Demonstradores em Copromoção e co-financiado pelo FEDER através do NORTE 2020 e do projeto de investigação NG_TPfib (POCI-01-0247-FEDER-033719) financiado pelo FEDER através do Programa Operacional Factores de Competitividade (COMPETE). O Projeto PreSlabTec foi desenvolvido pelo consórcio que integra as empresas CiviTest e Serralharia Cunha, e a Universidade do Minho. O Projeto NG_TPfib integra as empresas CiviTest e Exporplás. Agradece-se às empresas fornecedoras dos materiais para a execução do programa experimental, nomeadamente, à Radmix pelo fornecimento das fibras de aço, à BASF pelo superplastificante, à Secil pelo cimento e à Omya Comital pelo Filer calcário.

REFERÊNCIAS

- [1] Llano-Torre, A.; Serna, P. – “Recommendation of RILEM TC 261-CCF: test method to determine the flexural creep of fibre reinforced concrete in the cracked state”, *Materials and Structures*, 2021, p. 54-124.
- [2] Serna, P.; Llano-Torre, A.; Cavalaro, S.H.P. – *Creep Behaviour in Cracked Sections of Fibre Reinforced Concrete*, Proceedings of the International RILEM Workshop FRC-CREEP 2016. RILEM Bookseries, 2017, Springer.
- [3] Gettu, R., Zerbino, R., Jose, S. – *Factors Influencing Creep of Cracked Fibre Reinforced Concrete: What We Think We Know & What We Do Not Know*, Proceedings of the International RILEM Workshop FRC-CREEP 2016, Pedro Serna, Aitor Llano-Torre, Sergio H.P. Cavalaro Editors, RILEM BOOKSERIES, Volume 14, 2017, Springer, The Netherlands.

- [4] Pujadas, P., Blanco, A., Cavalaro, S., de la Fuente, A., Aguado, A. – “The need to consider flexural post-cracking creep behavior of macro-synthetic fiber reinforced concrete”, *Construction and Building Materials*, 149, 2017, p. 790-800.
- [5] EN 206 (2013)+A2 (2021) – “Concrete – Specification, performance, production and conformity”, CEN, Brussels, p. 103.
- [6] NP EN 12390-3:2019 – “Ensaaios do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão de provetes”, IPQ, Lisboa, p. 21.
- [7] NP EN 12390-13:2014 – “Ensaaios do betão endurecido. Parte 13: Determinação do módulo de elasticidade secante à compressão”, IPQ, Lisboa, p. 17.
- [8] Arango, S.E., Serna, P., Marti-Vargs, J.R. (2012) – “A test method to characterize flexural creep behaviour of pre-cracked FRC specimens”, *Experimental Mechanics Journal*, 52, 2012, p. 1067-1078.
- [9] EN 14651:2005 + A1 (2007) – “Test method for metallic fibre concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual)”, CEN, Brussels, p. 17.
- [10] MC2010 – *fib Model Code for Concrete Structures 2010*, fib, Suíça, p. 402.
- [11] Abrishambaf, A. – *Creep Behaviour of Cracked Steel Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete Laminar Structures*, Tese de doutoramento, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, 2015, p. 307.