

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DO ESTÁGIO PÓS-FISSURAÇÃO EM UM CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS

IVA EMANUELLY PEREIRA LIMA¹, ALINE DA SILVA RAMOS BARBOZA²

¹Doutoranda em Engenharia Civil/Estruturas, UFAL, Maceió-AL, ivaemanuellyl@gmail.com;

²Professora Doutora do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFAL, Maceió-AL, aline@lccv.ufal.br

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC
15 a 17 de setembro de 2021

RESUMO: A partir da adição de fibras como reforço ao concreto (CRF), percebeu-se que o principal efeito da adição dessas fibras no concreto é no estágio pós-fissuração, onde elas podem aumentar tanto a tenacidade quanto a resistência residual do compósito. A partir dessa problemática, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento em relação tanto a tenacidade quanto a resistência residual de uma amostra de concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) e de outra amostragem de concreto reforçado com fibras poliméricas (CRFP) em teores volumétricos de fibras correspondentes a 0,40% e 1,00%, respectivamente. De acordo com o estudo realizado, verificou-se que o CRFA apresentou uma maior tenacidade e também evidenciou valores superiores de resistências residuais, o que mostra que o CRFP analisado neste trabalho apresenta menor desempenho mecânico.

PALAVRAS-CHAVE: Estágio pós-fissuração, tenacidade, resistência residual.

EVALUATION OF POST-CRACKING STAGE PARAMETERS IN A FIBER REINFORCED CONCRETE

ABSTRACT: From the addition of fibers as reinforcement to concrete (FRC), it was noticed that the main effect of adding these fibers to concrete is in the post-cracking stage, where they can increase both the tenacity and the residual strength of the composite. From this issue, the present work aims to evaluate the behavior in relation to both the tenacity and the residual strength of a steel fiber reinforced concrete (SFRC) sample and another polymer fiber reinforced concrete (PFRC) sample in fiber volumetric contents corresponding to 0.40% and 1.00%, respectively. According to the study carried out, it was found that SFRC had higher tenacity and also showed higher values of residual strength, which shows that the PFRC analyzed in this work has lower mechanical performance.

KEYWORDS: Post-cracking stage, tenacity, residual strength.

INTRODUÇÃO

Os concretos com adição de fibras (CRF) são definidos como compósitos, cujas fases principais são o concreto (matriz) e as fibras (reforço) (Bentur & Mindess, 2007; Pasa, 2007; Figueiredo, 2011). No entanto, para que a adição das fibras no concreto ocorresse de forma satisfatória, diversas pesquisas começaram a ser realizadas (Hannant, 1994; Lopes, 2005).

A partir dessas pesquisas, percebeu-se que a adição de fibras propiciou um aumento significativo na capacidade de energia absorvida pelo compósito, onde esse aumento aconteceu porque os elementos de CRF possuem uma maior capacidade de interromper a propagação de fissuras (Hannant, 1994; Naaman, 2003; Martinie & Roussel, 2011). Sendo assim, verificou-se que o principal efeito da adição das fibras é no estágio de pós-fissuração, onde estas evitam a ruptura brusca do material (Naaman, 2003; Bentur & Mindess, 2007; Ferrara, 2015).

Isso posto, o comportamento do CRF é normalmente caracterizado por meio de ensaios relacionados ao estado pós fissuração e as principais propriedades que caracterizam esse estado são a tenacidade e a resistência residual (Di Prisco *et al.*, 2013; ACI 544.8R, 2016). Ao que se refere a

tenacidade, este parâmetro é estabelecido como a capacidade de energia absorvida pelo compósito ao ser carregado (Ferrara *et al.*, 2007; Figueiredo, 2011; Ferrara, 2015). Ao que está relacionado a resistência residual, este indicador é calculado a partir da carga sustentada pelo corpo de prova em deslocamentos específicos (Naaman, 2003; Figueiredo, 2011; Vassaneli *et al.*, 2012).

Diante disso, e sabendo que o principal efeito da adição das fibras como reforço no concreto é no estágio pós-fissuração, onde as principais propriedades que caracterizam esse estado são a tenacidade e a resistência residual, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento desses dois parâmetros em uma amostra de concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) e outra amostragem de concreto reforçado com fibras poliméricas (CRFP), que apresentam um teor volumétrico de fibras correspondente a 0,40% e 1,00%, respectivamente.

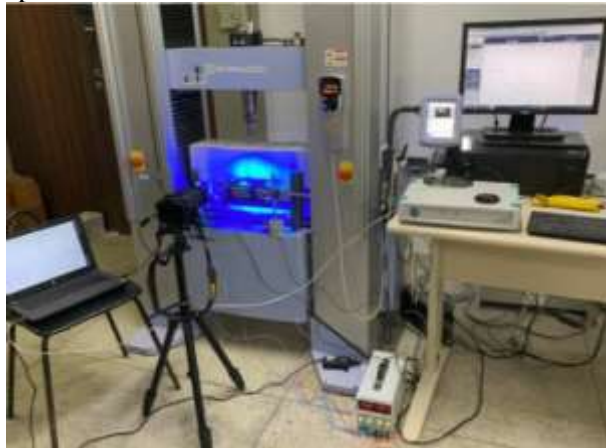
MATERIAL E MÉTODOS

A matriz utilizada na produção dos concretos é composta dos seguintes materiais: agregado miúdo (areia), agregado graúdo (brita), cimento (CP V ARI RS), adição mineral (RBMG), água e aditivo superplastificante. Vale salientar que o RBMG é um resíduo de beneficiamento de mármore e granito, que foi coletado em uma indústria de rochas ornamentais, onde o mesmo funciona como um filler para a mistura e foi utilizado para contribuir com o aumento da coesão e viscosidade do concreto.

Ao que se refere ao reforço, para a confecção do CRFA, utilizou-se fibras de aço (módulo de elasticidade correspondente a 210 GPa) em um teor de 0,40% em relação ao volume de concreto e, para o CRFP, utilizou-se fibras poliméricas (módulo de elasticidade correspondente a 9,5 GPa) com um teor volumétrico de 1,00%. A dosagem da matriz foi desenvolvida a partir do método de Gomes *et al.* (2003) e, ao que está relacionado ao teor de adição de fibras, este parâmetro foi determinado utilizando-se do conceito de volume crítico proposto por Bentur e Mindess (2007).

Em relação ao ensaio no estado fresco, os concretos foram submetidos ao *slump-flow test* para avaliação da condição de fluidez, que foi realizado de acordo com a ABNT NBR 15823-2 (2017). Ao que se refere ao ensaio no estado endurecido, foi aplicado o ensaio de flexão a três pontos, normatizado pela EN 14651 (2007), onde a montagem do experimento pode ser vista na Figura 1.

Figura 1. Montagem do experimento.



Diante disso, a partir dos resultados provenientes do ensaio de flexão, pode-se calcular a resistência à tração na flexão residual e a resistência referente ao limite de proporcionalidade dos compósitos. Ao que se refere a primeira, este valor pode ser determinado por meio da Equação 1 e, em relação a segunda, utiliza-se a Equação 2.

$$f_{R,j} = \frac{3F_j l}{2bh_{sp}^2} \quad (1)$$

$$f_{ct,L}^f = \frac{3F_L l}{2bh_{sp}^2} \quad (2)$$

Sendo: $f_{R,j}$: resistência residual correspondente à abertura de fissura j ; F_j : carga correspondente à abertura de fissura; l : vão de ensaio; b : largura do corpo de prova; h_{sp} : distância entre o topo do

entalhe e a face superior do corpo de prova; $f_{ct,L}^f$: limite de proporcionalidade; F_L : carga máxima dentro do intervalo de abertura de fissura entre 0 e 0,05 mm.

Ainda de acordo com o *fib* Model Code 2010 (2013), para garantir o bom desempenho do compósito em elementos estruturais, as fibras podem substituir as barras ou as telas metálicas, total ou parcialmente, se as Equações 3 e 4 forem satisfeitas.

$$\frac{f_{R1k}}{f_{Lk}} \geq 0,4 \quad (3)$$

$$\frac{f_{R3k}}{f_{R1k}} \geq 0,5 \quad (4)$$

Em que: f_{R1k} : resistência residual do estado limite de serviço; f_{R3k} : resistência residual do estado limite último; f_{Lk} : limite de proporcionalidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em relação ao ensaio no estado fresco, os concretos foram caracterizados por meio do ensaio de espalhamento a partir da ABNT NBR 15823-2 (2017), como já mencionado. Para isso, foram realizados dois dias de produção para cada tipo de compósito e esses resultados estão apresentados na Tabela 1 para o CRFA e CRFP, respectivamente.

Tabela 1. Resultados do ensaio no estado fresco – CRFA e CRFP, respectivamente.

Parâmetro	Produção 1	Produção 2
Espalhamento (mm)	700	745
Tempo de escoamento (s)	4,0	3,2
Parâmetro	Produção 1	Produção 2
Espalhamento (mm)	715	710
Tempo de escoamento (s)	4,5	4,4

Analisando os dados da Tabela 1, percebe-se que ambos os concretos se encontram dentro do intervalo recomendado pela literatura para concreto fluido, apresentando diâmetro final entre 650 e 850 mm e tempo para atingir o diâmetro de espalhamento de 50 cm (t_{500}) entre 3 e 7 segundos. Diante disso, nota-se que a adição das fibras em um teor volumétrico de 0,40% não afetou de maneira significativa a fluidez da mistura do CRFA e a adição das fibras em um teor volumétrico de 1,00% não afetou a fluidez da mistura do CRFP.

Ao que se refere ao ensaio no estado endurecido, foi aplicado o ensaio de flexão a três pontos, como também já mencionado. Sendo assim, após a aplicação desse ensaio, para as oito vigas de CRFA e as oito vigas de CRFP, foram calculados os limites de proporcionalidade e as resistências residuais, utilizando as Equações 1 e 2 e, depois disso, verificou-se as relações f_{R1}/f_L e f_{R3}/f_{R1} (Tabela 2).

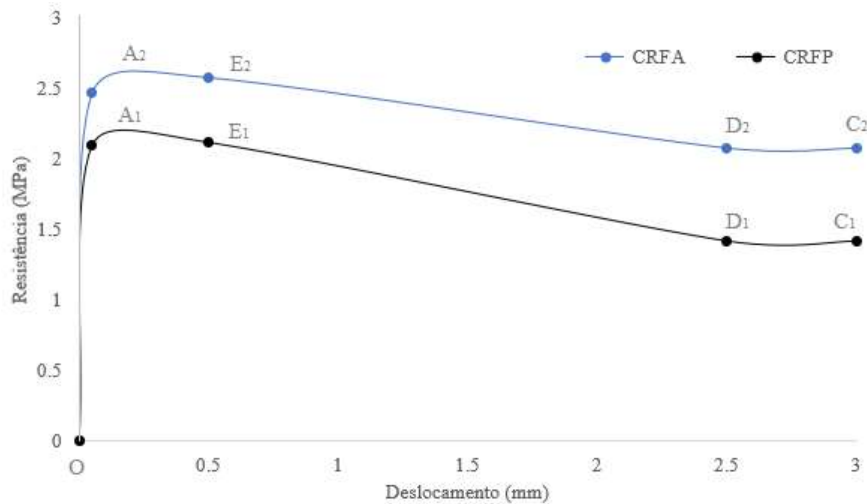
Tabela 2. Resultados do CRFA e CRFP, respectivamente.

Identificação	Fibras de aço (CRFA)		Fibras poliméricas (CRFP)	
	f_{R1}/f_L	f_{R3}/f_{R1}	f_{R1}/f_L	f_{R3}/f_{R1}
V1	1,05	0,76	1,03	0,90
V2	1,04	0,84	0,97	0,65
V3	1,02	0,81	0,99	0,65
V4	1,02	0,81	0,95	0,64
V5	1,08	0,89	1,06	0,54
V6	1,03	0,77	1,01	0,56
V7	1,06	0,73	1,02	0,73
V8	1,07	0,76	1,08	0,68
Média	1,04	0,80	1,01	0,67

Como pode-se observar a partir da Tabela 2, nota-se que para todas as amostras ensaiadas, as relações f_{R1}/f_L e f_{R3}/f_{R1} são superiores a 0,4 e 0,5, respectivamente, como exigido por meio das

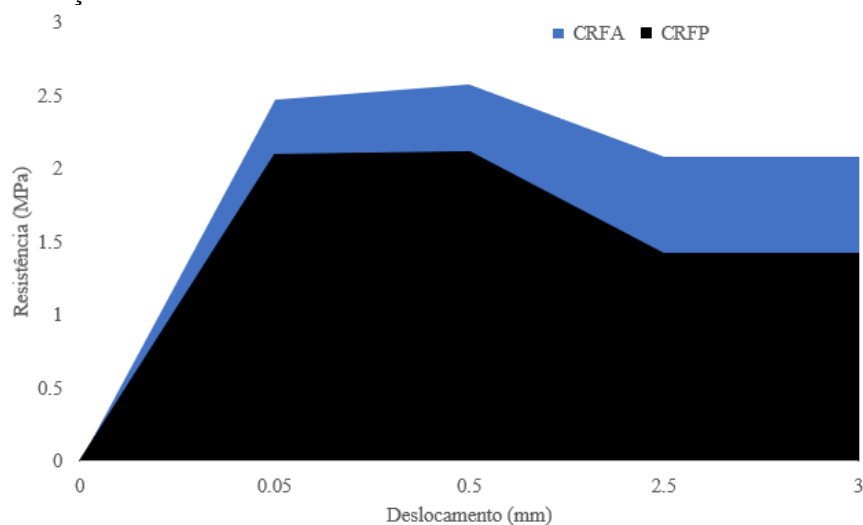
Equações 3 e 4. Isso mostra que, de acordo com o *fib* Model Code 2010 (2013), a utilização de fibras de aço no teor volumétrico de 0,40% (para o CRFA) e a utilização de fibras poliméricas no teor de 1,00% (para o CRFP) atendem aos critérios exigidos de projeto, onde isso permite a substituição parcial ou total da armadura de flexão para esses níveis de sollicitação. Ademais, sabendo que as principais propriedades que caracterizam o estágio pós-fissuração são a resistência residual e a tenacidade do compósito, fez-se uma análise referente a esses parâmetros (Figuras 2 e 3).

Figura 2. Resistência residual dos concretos analisados.



A partir da Figura 2, e tomando como exemplo a curva O – A1 – E1 – D1 – C1, ao chegar no ponto A1, há um pico de tensão, onde ocorre o amolecimento do concreto. Após o pico A1, a tensão vai diminuindo e depois acontece a fratura do CRFP no ponto E1 e, neste ponto, a resistência residual corresponde a abertura de fissura de 0,5 mm. Depois disso, a tensão continua reduzindo e do ponto E1 a D1 é indicado o plano de falha, até ser determinada a resistência residual correspondente a abertura de fissura de 2,5 mm. A partir do ponto D1, a força é estabilizada e isto pode ser observado na curva de D1 a C1. Como pode-se observar, a resistência residual corresponde ao valor de carga resistida pelo compósito para deslocamentos específicos. Ainda, fazendo uma analogia entre as curvas correspondentes ao CRFP (curva preta) e CRFA (curva azul), pode-se verificar também que os concretos produzidos com fibras poliméricas apresentam um desempenho mecânico inferior em relação aos concretos confeccionados com fibras de aço.

Figura 3. Determinação da tenacidade dos concretos analisados.



Em observação da Figura 3, percebe-se que o CRFA apresenta uma área sob a curva maior que

a do CRFP, o que indica que esse compósito apresenta uma maior tenacidade e, conseqüentemente, denota uma maior capacidade de energia absorvida pelo concreto ao ser carregado. A partir disso, percebe-se visivelmente que o CRFA apresenta uma maior capacidade resistiva, o que mostra também que os concretos confeccionados com fibras de aço apresentam valores maiores de resistência.

CONCLUSÃO

De acordo com a investigação feita, verificou-se que o CRFA apresentou uma área sob a curva maior que a do CRFP, o que indicou que esse compósito apresenta uma maior tenacidade e, conseqüentemente, denota uma maior capacidade de energia absorvida pelo concreto ao ser carregado. Ao que está relacionado com a resistência residual, o CRFA apresentou resistências maiores para os deslocamentos específicos que foram analisados, o que mostra também que os concretos confeccionados com fibras de aço apresentam valores maiores de resistência.

Sendo assim, pode-se dizer que o presente trabalho alcançou as metas sugeridas inicialmente, onde foi avaliado o comportamento referente à tenacidade e resistência residual em uma amostra de CRFA e outra amostragem de CRFP, onde os resultados mostraram que o CRFA apresenta valores superiores de tenacidade e resistência residual e, conseqüentemente, denota um melhor desempenho mecânico.

REFERÊNCIAS

- American Concrete Institute. ACI 544.8R-16: Indirect method for obtaining the stress/strain response of fiber-reinforced concrete (FRC). Dubai, 2016.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 15823-2: Concreto autoadensável. Parte 2 – Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual – Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2017.
- Bentur, A.; Mindess, S. Fiber Reinforced Cementitious Composites. London and New York: Modern Concrete Technology Series, 2 ed. 2007.
- Di Prisco, M.; Colombo, M.; Dozio, D. Fibre-reinforced concrete in *fib* Model Code 2010: Principles, Models and Test Validation. Structural Concrete. 2013.
- European Committee for Standardization. EN 14651: Test method for metallic fiber-reinforced concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual), CEN, London. 2007.
- Fédération Internationale du Béton – FIB. *fib* Model Code for Concrete Structures 2010. Switzerland, 2013.
- Ferrara, L.; Park, Y. D.; Shah, S.P. A method for mix-design of fiber-reinforced self-compacting concrete. Cement and Concrete Research, 2007.
- Ferrara, L. Tailoring the Orientation of Fibres in High Performace Fibre Reinforced Cementitious Composites: Part 1 – Experimental Evidence, Monitoring and Prediction. Int. J. Materials and Structural Integrity. 2015.
- Figueiredo, A. D. Concreto Reforçado com Fibras. Tese (Livro docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo: São Paulo, 2011.
- Gomes, P. C. C.; Gettu, R.; Agulló, L. Uma Nova Metodologia para Obtenção de Concreto Autoadensável de Alta Resistência com Aditivos Minerais. In: V simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto. São Paulo, 2003.
- Hannant, L. Fiber-reinforced Cements and Concretes. 2. Ed. London, 1994.
- Lopes, M. M. Substituição parcial de armaduras de flexão em vigas de concreto. Programa de Pós-graduação de Engenharia – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005.
- Martinie, L.; Roussel, N. Simple Tools for Fiber Orientation Prediction in Industrial Practice. Cement and Concrete Research. 2011.
- Naaman, A. E. Fiber reinforcements for concrete: looking back, looking ahead. In: RILEM Proceedings. PRO 15, RILEM Publications SARL, 2003.
- Pasa, V. S. Análise do comportamento de estruturas de concreto reforçado com fibras de aço via método dos elementos finitos. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.
- Vassaneli, E.; Micelli, F.; Aiello, M. Plizzari, G. Crack width prediction of FRC beams in short and long term bending condition. Materials and Structures. 2012.