

DEFORMABILIDADE DE VIGAS EM CONCRETO ARMADO COM PRF (PLÁSTICO REFORÇADO POR FIBRAS)

E. M. Silva (1); S. M. C. Diniz (2); S. E. C. Ribeiro (3);

(1) *Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais; elayne.msilva@yahoo.com.br*

Avenida Antônio Carlos, nº 6627, Pampulha, CEP: 31.270-901, Belo Horizonte, MG

(2) *Professora Doutora do Departamento de Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais*

(3) *Professora Doutora do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Universidade Federal de Minas Gerais*

RESUMO

Os Plásticos Reforçados por Fibras (PRF) proporcionam uma perspectiva promissora para o uso como armadura, que pode oferecer além de maior durabilidade, maior resistência e, como consequência, ganhos potenciais em todo o ciclo de vida da estrutura. As características desses materiais levaram a novos desafios no projeto de componentes de concreto armado com PRF (CA-PRF). Enquanto que muitos problemas de projeto são controlados pelo estado limite último, estados limites de utilização relacionados às flechas máximas e às fissuras usualmente controlam o projeto de vigas em CA-PRF. Neste estudo, é realizada a avaliação da deformabilidade de vigas de CA-PRF projetadas de acordo com o ACI-440 (2006) e a seleção de um modelo determinístico para o cálculo do momento de inércia efetivo, que influencia o cálculo da flecha. A simulação de Monte Carlo é empregada com vistas à obtenção das estatísticas (média, mínima, máxima, desvio padrão e coeficiente de variação) das flechas.

Palavras-Chave: concreto armado, PRF, flechas, estado limite de utilização, vigas.

1 INTRODUÇÃO

Estruturas de concreto armado (CA) são muitas vezes sujeitas a sais descongelantes (nos países de clima frio) ou estão inseridas em ambiente marinho. Como tal, um grande problema para a durabilidade dessas estruturas é a corrosão das armaduras de aço. Neste contexto, os Plásticos Reforçados por Fibras (PRF), como materiais não corrosivos, proporcionam uma perspectiva promissora para o uso como armadura interna em estruturas de CA. Embora o uso de PRF como armadura estrutural mostre uma grande promessa em termos de durabilidade, as características desses materiais levaram a novos desafios no projeto de componentes de concreto armado com PRF (CA-PRF).

O PRF, como um material de alto desempenho, pode oferecer não só uma maior resistência, mas também maior durabilidade e, como consequência, ganhos potenciais em todo o ciclo de vida da estrutura. Além disso, as vantagens

específicas desse material podem ser combinadas em sistemas inovadores, como no caso de vigas e lajes de CA-PRF.

Enquanto que muitos problemas de projeto são controlados pelo estado limite último, estados limites de utilização relacionados às flechas máximas e às fissuras usualmente controlam o projeto de vigas de CA-PRF. Uma vez que o PRF é caracterizado por elevados valores de resistência e menor módulo de elasticidade em relação ao aço, isso implica que o projeto de estruturas de CA-PRF será controlado quase que exclusivamente pelo estado limite de utilização ^{(1) (2)}.

Como a maioria das variáveis envolvidas no projeto (propriedades mecânicas do concreto e do PRF, características geométricas, erro do modelo, cargas, etc.) são aleatórias, métodos probabilísticos são necessários no estudo da deformabilidade desses elementos estruturais. Assim, este estudo tem como objetivo apresentar a avaliação probabilística das flechas de vigas de CA-PRF projetadas de acordo com o ACI-440 (2006) e a seleção do modelo determinístico para o cálculo do momento de inércia efetivo, que influencia no cálculo da flecha. A simulação de Monte Carlo é empregada com vistas à obtenção das estatísticas das flechas (média, mínima, máxima, desvio padrão e coeficiente de variação).

2 PLÁSTICO REFORÇADO POR FIBRAS (PRF)

O PRF é formado por fibras, usualmente de vidro (VPRF), aramida (APRF) ou carbono (CPRF) envolvidas em resinas sintéticas ou plásticas formando uma matriz polimérica. As barras têm vários tipos de seção transversal (circular, quadrada, sólida ou vazada) e superfície de aderência ⁽³⁾ (Fig. 1).

As fibras têm a função de absorver as tensões de tração decorrentes dos esforços atuantes, enquanto que a matriz polimérica tem como funções manter as fibras coesas, propiciar a transferência das tensões de cisalhamento entre o concreto e a fibra e proteger as fibras de danos mecânicos e ambientais. A resina da matriz fornece suporte lateral para a fibra contra flambagem sob carregamento de compressão ⁽³⁾.



Figura 1: Barras de PRF ⁽⁴⁾.

As barras de PRF podem ser fabricadas através de uma variedade de técnicas como a pultrusão, o entrançamento e a tecelagem ^(5, 6). Entretanto, o processo mais utilizado na fabricação do PRF é a pultrusão ⁽⁷⁾. O processo de fabricação influencia diretamente no módulo de elasticidade do PRF, pois depende da proporção dos materiais utilizados e dos detalhes de cada etapa do processo, diferente do módulo de elasticidade do aço.

A Tab. 1 apresenta algumas propriedades mecânicas das barras de VPRF, APRF e CPRF. Nesta tabela, para efeito de comparação, também são apresentadas as correspondentes propriedades das barras de aço.

Tabela 1 – Propriedades das barras de aço e de PRF ⁽³⁾.

Propriedades	AÇO	VPRF	APRF	CPRF
Peso específico (g/cm ³)	7,9	1,25 a 2,10	1,25 a 1,40	1,50 a 1,60
Tensão de escoamento nominal (MPa)	276 a 517	N/A	N/A	N/A
Resistência à tração (MPa)	483 a 690	483 a 1600	1720 a 2540	600 a 3690
Módulo de elasticidade (GPa)	200	35 a 51	41 a 125	120 a 580
Deformação no escoamento (%)	0,14 a 0,25	N/A	N/A	N/A
Deformação na ruptura (%)	6,0 a 12,0	1,2 a 3,1	1,9 a 4,4	0,5 a 1,7

* Valores típicos para uma relação volumétrica das fibras variando de 0,5 a 0,7.

** N/A: Não apresenta.

A resistência à tração das barras de PRF está diretamente ligada ao diâmetro da barra por uma relação inversa, em que quanto menor o diâmetro da barra, maior é a resistência à tração do PRF (Tab.2) ⁽³⁾.

Tabela 2 – Resistência à tração mínima do PRF em função do diâmetro das barras comercialmente disponíveis ⁽⁸⁾.

Conversão métrica	Resistência à tração mínima (MPa)	
	VPRF	CPRF
Nº 6	760	1450
Nº 10	760	1310
Nº 13	690	170
Nº 16	655	1100
Nº 19	620	1100
Nº 22	586	N/A
Nº 25	550	N/A
Nº 29	517	N/A
Nº 32	480	N/A

**N/A: barras não estão comercialmente disponíveis nessas dimensões

Enquanto o aço apresenta um comportamento elasto-plástico (dúctil), o PRF apresenta um comportamento elasto-frágil, caracterizado por uma relação elástica-linear de tensão-deformação até a ruptura. A Fig. 2 representa um diagrama das relações existentes entre tensões e deformações específicas do aço, VPRF, APRF e CPRF.

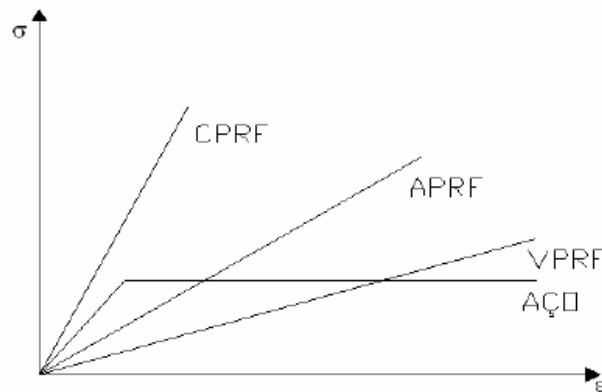


Figura 2: Diagramas tensão-deformação do aço, VPRF, APRF, CPRF ⁽⁹⁾.

3 VIGAS DE CONCRETO ARMADAS COM PRF (CA-PRF)

As recomendações de projeto do ACI 440 (2006) para estruturas em CA-PRF seguem o método dos estados limites e são semelhantes ao projeto de estruturas em CA. No caso brasileiro, nenhuma norma foi desenvolvida até o momento para tal finalidade. Geralmente as vigas em CA apresentam uma falha dúctil em que o escoamento do aço acontece antes do esmagamento do concreto. No caso de vigas em CA-PRF, a falha da barra é repentina e catastrófica ⁽¹⁰⁾. Então os modos de falha (ruptura do PRF e esmagamento do concreto) são frágeis, porém aceitáveis, desde que a resistência e os critérios de serviço estejam satisfeitos. Para compensar a falta

de ductilidade, o ACI 440 (2006) prescreve uma margem de segurança maior do que a usada para o concreto armado tradicional, de forma que a barra tenha uma reserva mais alta de resistência.

O cálculo da resistência das seções transversais deve ser feito baseado nas seguintes hipóteses ⁽³⁾: (i) a deformação no concreto e no PRF deve ser proporcional à distância do eixo neutro; (ii) é assumido que a deformação máxima de compressão no concreto é de 0,003; (iii) a resistência à tração do concreto é ignorada; (iv) o comportamento à tração do PRF é linearmente elástico até a falha; e (v) existe aderência perfeita entre o concreto e o PRF. No item 8 do ACI 440 (2006) está descrito o procedimento de dimensionamento à flexão de peças de CA-PRF.

4 FLECHAS DE VIGAS EM CA-PRF

Flechas em vigas de CA-PRF tendem a ser maiores em magnitude se comparadas às flechas em vigas de CA por causa da menor rigidez associada às barras de PRF comercialmente disponíveis ⁽³⁾. O presente estudo se restringe às flechas imediatas. O cálculo de flechas de vigas em CA-PRF é feito através de uma equação que depende do tipo de carregamento da estrutura e é baseada no módulo de elasticidade do concreto (E_c) e no momento de inércia efetivo (I_e). Várias equações foram sugeridas para o cálculo de I_e como variantes da equação original de Branson ⁽¹¹⁾. A equação de Branson ⁽¹²⁾ não é recomendada para ser usada para o cálculo de I_e de vigas em CA-PRF pois não modela corretamente a contribuição do concreto tracionado para vigas com razão “momento de inércia da seção bruta de concreto, I_g ” e “momento de inércia da seção fissurada, I_{cr} ”, isto é, I_g / I_{cr} maior do que 4 (independente se a armadura é aço ou PRF) ⁽¹³⁾. No presente estudo, a razão I_g / I_{cr} das vigas em CA-PRF está na faixa de 6 a 34. A rigidez das vigas em CA-PRF foi superestimada quando calculada pela equação de Branson ⁽¹²⁾ e a flecha foi subestimada consideravelmente.

Apesar de todas as equações propostas para I_e terem apresentado limitações para o cálculo de flecha em vigas de CA-PRF, a Eq. (A) ^(3, 14) foi a que apresentou maior consistência no cálculo e por esse motivo foi adotada neste estudo ⁽¹⁾.

$$I_e = \left\{ \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \beta_d I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \right\} \leq I_g \quad (A)$$

em que M_{cr} = momento de fissuração; M_a = momento máximo na viga; I_g = momento de inércia da seção bruta de concreto; I_{cr} = momento de inércia na seção fissurada de concreto no Estádio II; β_d = fator de redução dado por $\beta_d = \left(\frac{1}{5}\right) \cdot \left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}}\right) \leq 1.0$, em que ρ_f = taxa de armadura longitudinal do PRF; e ρ_{fb} = taxa de armadura balanceada de PRF.

5 AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA DA DEFORMABILIDADE DE VIGAS EM CA-PRF

5.1 Configuração Estrutural

Foram projetadas 81 vigas em CA-PRF segundo as recomendações do ACI 440 (2006) referentes a três resistências à compressão do concreto ($f'_c = 30$ MPa, 50 MPa e 70 MPa), três resistências à tração do PRF (425 MPa, 850 MPa e 1275 MPa), uma seção transversal (20x30 cm), taxas de armadura longitudinal de PRF na faixa de 0,82 a $1,66\rho_{fb}$, correspondendo a vigas subarmadas, de transição e superarmadas, e três razões de carregamento, “média da carga permanente/ média da sobrecarga” (μ_{CP} / μ_{SC}) iguais a 0,5, 1 e 2. Devido ao menor custo dentre os três tipos de fibras mais utilizadas na construção civil (carbono, aramida e vidro), foi considerado que todas as vigas analisadas foram armadas com barras de PRF com fibras de vidro (VPRF). Foram usadas barras de PRF com diâmetros de 6,3 a 25 mm. As variáveis assumidas como determinísticas foram o vão da viga ($L = 3$ m) e a área das barras de PRF (A_{PRF}), que será tomada como um valor igual ao da área nominal das mesmas. Neste estudo foram consideradas vigas biapoizadas de vão L sujeitas às cargas permanente (CP) e sobrecarga (SC), uniformemente distribuídas e flecha Δ dada por:

$$\Delta = \frac{5 p_{serv} L^4}{384 E_c I_e} \quad (B)$$

em que p_{serv} é a carga de serviço.

5.2 Simulação de Monte Carlo

Como a maioria das variáveis envolvidas no cálculo de flechas de vigas em CA-PRF (propriedades mecânicas do concreto e do PRF, características

geométricas, cargas, etc.) são aleatórias, métodos probabilísticos são necessários na caracterização de tais grandezas. Para tal, neste trabalho foi utilizada a Simulação de Monte Carlo (SMC), sendo requeridos: (i) a descrição estatística das variáveis básicas pertinentes ao problema em questão, e (ii) a relação determinística entre essas variáveis. A SMC envolve a repetição do processo de simulação, usando em cada simulação um conjunto particular de valores das variáveis aleatórias geradas de acordo com a correspondente distribuição de probabilidade ⁽¹⁵⁾. Neste estudo, a utilização da SMC permitiu a obtenção das estatísticas (média, desvio padrão, coeficiente de variação e tipo de distribuição) das flechas de vigas em CA-PRF.

A seleção de um modelo determinístico (ver item 4) para o cálculo de I_e levou em consideração a disponibilidade de informações referentes à variável aleatória “erro do modelo”, isto é, a razão “flecha experimental/ flecha calculada” ($\Delta_{exp}/ \Delta_{calc}$) na literatura. As estatísticas das variáveis básicas consideradas neste estudo (propriedades mecânicas dos materiais, geometria da seção transversal e cargas) foram obtidas a partir de informações disponíveis na literatura e estão resumidas na Tab. 3.

O módulo de elasticidade do concreto, E_c , é tomado como uma variável aleatória derivada da resistência à compressão do concreto, f_c , definida como sendo $E_c = 4700\sqrt{f_c}$ (MPa) ⁽¹⁶⁾. O momento de fissuração, M_{cr} , é tomado como uma variável aleatória derivada das variáveis módulo de ruptura do concreto, f_r , e momento de inércia da seção bruta de concreto, I_g , conforme Eq. (C) a seguir ⁽¹⁶⁾:

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t} \quad (C)$$

em que y_t é uma variável assumida como determinística igual a distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada. O módulo de ruptura do concreto, f_r , por sua vez, é tomado como uma variável aleatória derivada da variável resistência à compressão do concreto, f_c , definida como sendo $f_r = 0,62\sqrt{f_c}$ (MPa) ⁽¹⁶⁾; I_g é assumido como sendo uma variável aleatória dada por $bh^3/ 12$.

Tabela 3 – Resumo das estatísticas das variáveis básicas.

Variável Básica	Média (μ)	Desvio Padrão (σ)	Coefficiente de Variação (COV)	Tipo de distribuição de probabilidade
Dimensões ⁽¹⁷⁾				
$\Delta_h^{(a)}, \Delta_b^{(b)}$	1,524 mm	6,35 mm	0,0417	Normal
$\Delta_c^{(c)}$	6,35 + 0,004 h (mm)	4,22 mm	-	Normal
Resistência à compressão do concreto $*(f'_c)^{(17, 18)}$				
$f'_c = 30$ MPa	34,64 MPa	3,46 MPa	0,10	Lognormal
$f'_c = 50$ MPa	57,74 MPa	5,77 MPa	0,10	Lognormal
$f'_c = 70$ MPa	80,83 MPa	8,08 MPa	0,10	Lognormal
Resistência à tração do VPRF $(f^*_{fu})^{(19)}$				
$f^*_{fu} = 425$ MPa	500 MPa	25 MPa	0,05	Normal
$f^*_{fu} = 850$ MPa	1000 MPa	50 MPa	0,05	Normal
$f^*_{fu} = 1275$ MPa	1500 MPa	75 MPa	0,05	Normal
Módulo de elasticidade do VPRF $(E_{PRF})^{(19)}$				
$E_{PRF} = 35$ GPa	35 GPa	1750 MPa	0,05	Normal
$E_{PRF} = 42,5$ GPa	42,5 GPa	2125 MPa	0,05	Normal
$E_{PRF} = 50$ GPa	50 GPa	2500 MPa	0,05	Normal
Cargas				
Tipo de carga	μ_v / U_m^{**}	Coefficiente de Variação (COV)		Tipo de distribuição de probabilidade
Peso Próprio ⁽²⁰⁾	1,05	0,10		Normal
Sobrecarga (ELU) ⁽²⁰⁾	1,00	0,25		Tipo I
Sobrecarga (ELS) ⁽²¹⁾	0,65	0,32		Tipo I

(a) Valor nominal da altura; (b) valor nominal da largura; (c) valor nominal do cobrimento

* Valores para a resistência do corpo de prova cilíndrico

** μ_v / U_m = razão média / valor característico

5.3 Exemplo Numérico

Para efeito de ilustração do procedimento adotado na análise de deformabilidade de vigas em CA-PRF, será considerada uma viga subarmada, biapoiada, sujeita a carregamento uniformemente distribuído (peso próprio, CP_n , e sobrecarga, SC_n), com as seguintes características: $L = 3$ m; $A_{PRF} = 6,03$ cm² (3 Φ 16); $E_{PRF} = 35$ GPa; $f^*_{fu} = 425$ MPa (resistência à tração do PRF); diâmetro do estribo = 9,5 mm; cobrimento = 35 mm; seção transversal da viga = 20x30 cm; $f_{ck} = 30$ MPa (resistência à compressão do concreto característica) e razão $\mu_{CP} / \mu_{SC} = 0,5$ (média da carga permanente/ média da sobrecarga).

O dimensionamento da viga à flexão foi feito baseado nos procedimentos descritos no item 8 do ACI 440 (2006). Para a determinação das estatísticas do carregamento foi considerado que a resistência de cálculo (ΦM_n , em que Φ é o fator de minoração do momento resistente; M_n é o momento resistente nominal) é igual à solicitação de cálculo (M_d), ou seja, $\Phi M_n = M_d$. Para a viga em estudo, M_d (Estado Limite Último - ELU) é igual a 25,64 kN.m. Pelo procedimento descrito em ^(9, 18), as médias μ_{CP} e μ_{SC} e as correspondentes cargas nominais (CP_n e SC_n) são obtidas. A média de SC no Estado Limite de Serviço (ELS), $\mu_{SC(serv)}$ é tomada como 0,65 SC_n

(ver Tab. 3), μ_{CP} no ELS foi tomada como igual a μ_{CP} no ELU, iguais a 6,82 kN/m e 5 kN/m, respectivamente. Com as informações relativas à $\mu_{SC(serv)}$, μ_{CP} , e as estatísticas descritas na Tab. 3, números aleatórios correspondentes às variáveis CP e $SC_{(serv)}$ podem ser gerados. Assim, a média da carga de serviço, p_{serv} , (Eq. (B)) sendo a soma de μ_{CP} e μ_{SC} é igual a 11,82 kN/m.

A SMC para a avaliação probabilística das flechas de vigas em CA-PRF foi implementada no software Matlab, para uma amostra correspondente a 100.000 elementos (simulações). A Fig. 3 mostra o histograma obtido via SMC e uma Distribuição Lognormal ajustada a esses dados, indicando que tal distribuição descreve adequadamente a variabilidade das flechas da viga em análise.

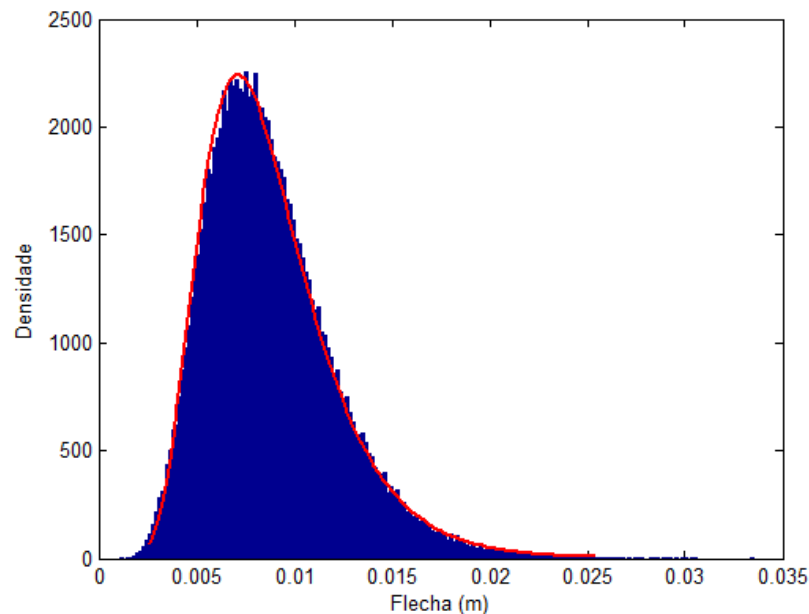


Figura 3: Histograma da flecha e a correspondente distribuição Lognormal.

A análise estatística da amostra obtida conduziu às informações apresentadas na Tab. 4. O coeficiente de variação (COV) de 37,50% indica que os resultados apresentam uma elevada dispersão.

Tabela 4 –Estatísticas da flecha obtidas via SMC.

Flecha (Δ) em m			Desvio Padrão (σ)	Coeficiente de Variação (COV)
Mínimo	Média	Máxima		
0,0011	0,0088	0,0335	0,0033	0,3750

6 SUMÁRIO E CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo a avaliação probabilística das flechas de vigas de CA-PRF projetadas de acordo com o ACI-440 (2006). Para tal, foi utilizada a SMC

como método probabilístico para a análise, com especial atenção para os requisitos necessários para o seu uso. Foram apresentados: (i) a configuração estrutural das vigas em análise; (ii) os critérios para a seleção do modelo determinístico para o cálculo do momento de inércia efetivo; e (iii) as estatísticas das variáveis básicas. Um exemplo numérico foi tomado para efeito de ilustração do procedimento adotado. O coeficiente de variação de 37,50% indica uma elevada dispersão das flechas, comprovando a necessidade da consideração da variabilidade dos parâmetros intervenientes no cálculo. O estudo da influência da variável aleatória “erro do modelo” não foi incluído na análise aqui apresentada; a avaliação de tal influência está em andamento como parte do trabalho de dissertação da primeira autora.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem os apoios financeiros concedidos pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais).

REFERÊNCIAS

1. MOTA, C.; ALMINAR, S., e SVECOVA, D. Critical Review of Deflection Formulas for FRP-RC Members, ***Journal of Composites for Construction, ASCE, 10(3), pp. 183-194, 2006.***
2. TEGOLA, A. Actions for Verification of RC Structures with FRP Bars. ***Journal of Composites for Construction, ASCE, 2(3), pp. 145-148, 1998.***
3. ACI Committee 440, ***Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars. ACI 440.1R-06, 2006.***
4. ACI Committee 440, ***Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars. ACI 440.1R-15, 2015.***
5. BAKIS, C. E. “FRP Composites: Materials and Manufacturing,” ***Fiber-Reinforced-Plastic for Concrete Structures: Properties and Applications, A. Nanni, ed., Elsevier, Amsterdam, pp. 13-58, 1993.***
6. BANK, L. C. “Properties of FRP Reinforcement for Concrete,” ***Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Properties and Applications, Developments in Civil Engineering, V. 42, A. Nanni, ed., Elsevier, Amsterdam, pp. 59-86, 1993.***

7. ACI Committee 440, ***State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. ACI 440R-96, 2002.***
8. ACI Committee 440, ***Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. ACI 440.2R, 2008.***
9. RIBEIRO, S. E. C. ***Análise de Confiabilidade de Vigas de Concreto Armado com Plástico Reforçado por Fibras.*** Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.
10. NANNI, A. Flexural Behavior and Design of Reinforced Concrete Using FRP Rods. ***Journal of Structural Engineering, V. 119, No. 11, pp. 3344-3359, 1993.***
11. SILVA, E.M.; DINIZ, S.M.C; RIBEIRO, S.E.C. Avaliação Probabilística das Flechas de Vigas de Concreto Armado com Plástico Reforçado por Fibras (PRF), ***58º Congresso Brasileiro de Concreto, p. 6-8, 2016.***
12. BRANSON, D. E. Instantaneous and Time-Dependent Deflections of Simple and Continuous Reinforced Concrete Beams. ***HPR Rep. Nº. 7, Part 1, Alabama Highway Dept., Bureau of Public Roads, Montgomery, AL, 1965.***
13. BISCHOFF, P.H. e GROSS, S.P. Design Approach for Calculating Deflection of FRP-Reinforced Concrete. ***Journal of Composites for Construction, ASCE, 2011.***
14. GAO, D.; BENMOKRANE, B.; e MASMOUDI, R. A Calculating Method of Flexural Properties of FRP-Reinforced Concrete Beams: Part 1: Crack Width and Deflection. ***Technical Report, Department of Civil Engineering, University of Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canadá, 24 pp, 1998.***
15. ANG, A. H. e TANG, W. H. ***Probability Concepts in Engineering Planning and Design – Decision, Risk and Reliability***, Vol. II, John Wiley & Sons. EUA, 1990.
16. ACI Committee 318. ***Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. ACI 318M-14, 2014.***
17. MIRZA, S. A. e MACGREGOR, J. G. ***Variability of Mechanical Properties of reinforced Bars. Journal of the Structural Division, ASCE, 105(5), pp 921-937, 1979.***
18. DINIZ, S. M. C. e FRANGOPOL, D. M., “Reliability Bases for High-Strength Concrete Columns”, ***Journal of Structural Engineering, ASCE, 123(10), 1997.***
19. PILAKOUTAS, K.; NEOCLEOUS, K. e GUADAGNINI, M. Design Philosophy Issues of Fiber Reinforced Polymer Reinforced Concrete Structures, ***Journal of Composites for Construction, ASCE, 6(3), pp 154-161, 2002.***
20. GALAMBOS, T. V.; ELLINGWOOD, B. R., MACGREGOR, J. G., e CORNELL, C. A., Probability-Based Load Criteria: Assessment of Current Design Practice, ***Journal of the Structural Division, ASCE, 108(5), 1982.***

21. GALAMBOS, T. V.; ELLINGWOOD, B. R., Serviceability limit states: Deflection, ***J. Struct. Eng.***, **10.1061/ (ASCE)0733-9445(1986)112: 1(67)**, 67–84, 1986.

DEFORMABILITY OF CONCRETE BEAMS REINFORCED WITH FIBER REINFORCED PLASTIC (FRP)

ABSTRACT

Fiber Reinforced Plastics (FRP) provide a promising prospect for use as reinforcement in reinforced concrete (RC) structures. These materials may offer not only greater durability but also higher resistance and, as a consequence, potential gains throughout the lifecycle of the structure. The characteristics of these materials have led to new challenges in the design of FRP reinforced concrete (FRP-RC) components. In many design problems ultimate limit states control; however, serviceability limit states related to the maximum deflections and cracks control the design of FRP-RC structures. This study is performed to evaluate the deformability of FRP-RC beams designed according to ACI-440 (2006); and the selection of a deterministic model to calculate the effective moment of inertia, influencing the calculation of the deflection. The Monte Carlo simulation is used in order to obtain statistics (mean, minimum, maximum, standard deviation and coefficient of variation) of the deflections.

Keywords: reinforced concrete, FRP, deflections, serviceability limit state, beams.