Aplicação do método form para análise da confiabilidade em vigas de concreto armado reforçadas com fibra de carbono

Muniz, Mara Bruna Silveira¹; Da Silva Júnior, Francisco Eudázio Suriano²; Real, Mauro de Vasconcellos³

¹Discente de mestrado em Engenharia Oceânica, Universidade Federal de Rio Grande, mbrunamuniz@gmail.com

²Discente de mestrado em Engenharia Oceânica, Universidade Federal de Rio Grande, jrsuri@outlook.com

³Prof. Dr., Universidade Federal de Rio Grande, mauroreal@furg.br

Resumo: as estruturas de concreto armado situadas em zonas marítimas ou portuárias estão inseridas em um ambiente altamente agressivo, que pode levar à corrosão da armadura de aço, assim, comprometendo o desempenho da estrutura. O presente trabalho tem o objetivo de analisar estatisticamente a confiabilidade de vigas de concreto armado reforçadas com PRFC (polímero reforçado com fibras de carbono) empregando o método *FORM* (Método de Confiabilidade de Primeira Ordem). Para validação do modelo determinístico das vigas, foram calculados os índices de confiabilidade β . Analisando os resultados obtidos das vigas danificadas em relação as vigas recuperadas, verificou-se que o projeto de recuperação das peças com o uso do PRFC, foi eficiente, visto que os índices de confiabilidade obtidos para as vigas reforçadas atingiram não só o valor de referência de β (3,8), como atingiram valores superiores em relação as vigas de referência. Portanto, conclui-se que, a utilização do método *FORM* para a geração dos dados mostrou-se satisfatória, dado que os resultados obtidos ficaram similares aos obtidos por Paliga [6], que realizou sua análise probabilística através dos elementos finitos e pela simulação de Monte Carlo.

Palavras-chave: Confiabilidade, Recuperação Estrutural, PRFC.

Abstract: Reinforced concrete structures located in sea or port areas are inserted in a highly aggressive environment, which can lead to corrosion of steel reinforcement, compromising its performance. The present work aims to analyze statistically the reliability of reinforced concrete beams, reinforced with CFRP (carbon fiber reinforced polymer reinforced), using the FORM (First Order Reliability Method) method. For the validation of the beams deterministic model, the reliability indexes β were calculated. Analyzing the results of the damaged beams in relation to the recovered beams, it was verified that the specimens recovery project, using CFRP, was efficient, since the reliability indexes obtained for the reinforced beams reached not only the reference value of the β (3,8), but also reached higher values in relation to the reference beams. Therefore, it can be concluded, the use of the *FORM* method for data generation was satisfactory, since the results obtained were similar to those obtained by Paliga [6], who performed its probabilistic analysis through finite elements and the Monte Carlo simulation.

Keywords: Reliability, Structural Recovery, CFRP.

1. Introdução

As estruturas de concreto armado situadas em zonas marítimas ou portuárias estão inseridas em um ambiente altamente agressivo, que pode levar à corrosão da armadura de aço, comprometendo o seu desempenho, ou mesmo levando a deterioração e ruína da estrutura. No contexto da recuperação de estruturas de concreto armado deterioradas, um método de reforço que vem ganhando destaque é a utilização de materiais compósitos, como é o caso do polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC). Este fato é facilmente compreensível, visto que tais materiais apresentam uma série de vantagens, como, elevada resistência à tração, baixo peso, facilidade de manuseio e de aplicação, e resistência à corrosão [1]

O dimensionamento de estruturas de concreto armado é realizado no Brasil seguindo os preceitos da norma da ABNT NBR 6118 [2]. Segundo Narváes [3], a norma brasileira, como a maioria das normas do mundo, segue a metodologia de dimensionamento semi-probabilístico. Neste método, as expressões dos estados limites são escritas com as variáveis aleatórias representadas por valores de projeto, que são valores com baixa probabilidade de ocorrência, e que possuem a finalidade de diminuir a probabilidade de falha associada ao estado limite. No entanto, esse método não permite a quantificação da probabilidade de falha e, portanto, não é uma medida de segurança uniforme, podendo conduzir a um dimensionamento contra a segurança ou antieconômico. A análise de confiabilidade de estruturas é uma ferramenta que possibilita o cálculo da probabilidade de falha associada a um estado limite e também um dimensionamento para uma probabilidade de falha alvo, entre outras vantagens.

As exigências fundamentais para que uma edificação seja considerada adequada para o seu uso engloba segurança, funcionalidade e durabilidade. Justamente nesse viés encontra-se o objetivo do presente trabalho, analisar estatisticamente a confiabilidade de vigas de concreto armado reforçadas com PRFC (polímero reforçado com fibras de carbono) empregando o método *FORM* (Método de Confiabilidade de Primeira Ordem).

2. Metodologia

2.1 Confiabilidade Estrutural

O problema fundamental da confiabilidade de estruturas é a avaliação da probabilidade de que a resistência de uma estrutura (ou componente estrutural) seja superior as solicitações provocadas pelo carregamento ao longo de toda a vida útil da estrutura. Devido às incertezas presentes tanto na resistência quanto no carregamento existe sempre uma probabilidade de falha associada a cada projeto. Assim tal garantia pode ser estabelecida apenas em termos probabilísticos, ou seja, a confiabilidade de uma estrutura deve ser medida em termos da probabilidade da resistência ser superior ao efeito do carregamento [3].

Segundo Ang e Tang [4], uma forma de avaliar o nível de segurança (confiabilidade) atingido no projeto de estruturas é determinar o índice de confiabilidade β e a correspondente probabilidade de falha, P_f , associada a β , tanto no que se refere aos

Estados Limites de Serviço, como aos Estados Limites Últimos. Para a definição do índice de confiabilidade β , é necessário definir-se uma função de estado limite M [4], como sendo a diferença entre a resistência R (carga de ruptura) da estrutura, e a solicitação S (soma da carga permanente G com a carga variável Q) (Eq. 1), a qual a estrutura é submetida, ou seja,

$$M = R - S \quad (1)$$

O índice de confiabilidade β é uma medida geométrica da probabilidade de falha, e representa a menor distância da origem do espaço normal padrão das variáveis aleatórias até o limite de falha da função de estado. Para calcular a probabilidade de falha (P_f) de uma estrutura que possua margem de segurança com distribuição normal, utiliza-se a seguinte equação (Eq. 2):

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (2)$$

onde, Φ é a função distribuição normal de probabilidade acumulada da variável M, ou seja, da margem de segurança. A Tabela 1 apresenta a relação entre os valores do índice de confiabilidade β e a probabilidade de falha em uma estrutura.

Tabela 1: Relação entre β e P_f [5]

β	P_f
0,00	$0,500 \times 10^0$
0,50	$0,309 \times 10^0$
1,00	$0,159 \times 10^0$
1,50	$0,668 \times 10^{-1}$
2,00	$0,228 \times 10^{-1}$
2,50	$0,621 \times 10^{-2}$
3,00	$0,135 \times 10^{-2}$
3,50	$0,233 \times 10^{-3}$
4,00	$0,317 \times 10^{-3}$

2.2 Modelo determinístico para cálculo da capacidade resistente da viga estudada

Para geração dos índices de confiabilidade β , das vigas de Paliga [6], reforçadas com PRFC, utilizou-se o método *FORM*, a princípio analisou-se os coeficientes β obtidos pelo autor, que gerou seus dados através do método dos elementos finitos e pela simulação de Monte Carlo.

Para determinar a capacidade resistente das vigas de Paliga [6], o autor considerou como parâmetros de projeto, as seguintes variáveis aleatórias, resistência à compressão do concreto, a tensão de escoamento do aço, a espessura do reforço, e a máxima tensão de aderência entre o concreto e a fibra de carbono. Bem como as parcelas de carregamento permanente e carregamento variável aplicados a peça.

A capacidade nominal de resistência à flexão da seção de um elemento reforçado com PRF pode ser determinada considerando-se a compatibilidade de deformações e o equilíbrio das forças internas e, ainda, controlando-se o modo de ruína. A Figura 1 ilustra a distribuição de deformações e de tensões utilizada pelo Código do ACI 440 [7] na verificação do equilíbrio interno de forças [8].

Figura 1: Distribuição de deformações e de tensões na seção, no estado limite último – ELU [8].

A capacidade nominal de flexão da seção no estado limite último, considerando-se a distribuição de deformações e de tensões apresentadas na Figura 1, pode ser obtida através da equação 3.

$$M_R = A_s * f_s * \left(d - \frac{\beta_{1c}}{2} \right) + \psi_f * A_f * f_{fe} * \left(h - \frac{\beta_{1c}}{2} \right) \quad (3)$$

Onde:

A_s é a área da armadura convencional de tração existente na seção;

f_s é a tensão de tração no aço;

h e d são: altura total e altura útil da seção, respectivamente;

β_1 é o fator de transformação do diagrama de tensões, podendo-se assumir 0,8;

c é a posição do eixo neutro (linha neutra), também denominado como “ x ” na literatura;

ψ_f é o coeficiente de minoração da resistência do PRF. Na flexão pode-se considerar igual a 0,85.

A_f é a área de PRF;

f_{fe} é a tensão de tração efetiva no PRF.

De acordo com o Comitê 440 da ACI [7], os estudos experimentais têm revelado que não é econômico a utilização de um número elevado de camadas de PRF, dado que a eficiência do reforço diminui com o número de camadas, ocorrendo a ruptura na interface substrato-fibra, não se mobilizando a capacidade resistente do PRF. Assim, o ACI ao recomendar que a deformação última de projeto do PRF diminua com o aumento da rigidez deste, está evitando a utilização de sistemas de reforço pouco econômicos.

2.3 Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (*FORM*)

Segundo Narváes [3], o método *FORM* é um método analítico aproximado para o cálculo da probabilidade de falha de uma função de estado limite. No método *FORM*, as variáveis aleatórias X (de distribuições quaisquer e dependentes entre si ou não) são transformadas do espaço original para o espaço normal padrão, em variáveis aleatórias estatisticamente independentes Y . A função de estado limite é escrita em função das variáveis do espaço normal padrão.

Para o presente trabalho utilizou-se o método de confiabilidade de primeira ordem (*FORM*) para a análise probabilística das vigas de referência, ou seja, não danificada e sem reforço, das vigas danificadas e das peças reforçadas.

2.4 Descrição das Vigas de Paliga

Para realização da análise da confiabilidade de vigas de concreto armado reforçadas com laminado de fibra de carbono, analisou-se as vigas de Paliga [6]. O autor projetou três vigas biapoizadas, com seção transversal retangular de 12 cm x 40 cm, vão de 4,00 m, que foram submetidas a uma carga uniformemente distribuída. As propriedades geométricas, configuração do carregamento e armaduras, são apresentadas na Fig. 2. As vigas foram projetadas seguindo-se os preceitos da NBR 6118/2014 [2].

Com a finalidade de analisar a eficiência do reforço nas vigas, denominadas de V1, V2 e V3, o autor considerou que ocorreu perdas de área da seção transversal da armadura tracionada da ordem de 10%, 20% e 30%. Portanto, o reforço à flexão das vigas de Paliga [6] foram projetados seguindo as recomendações da *fib* bulletin 14 [9], em lâminas de PRFC colados na face tracionada das vigas, a fim de recuperar a capacidade de carga original da peça.

Figura 2: Detalhamento das vigas estudadas [6].

Na Tabela 2 são apresentadas as propriedades mecânicas dos materiais, bem como suas variáveis aleatórias que serviram de parâmetros para o cálculo do índice de confiabilidade β .

Tabela 2: Propriedades mecânica das vigas em estudo [6].

Material	f_k (MPa)	f_m (MPa)	Coef. de Variação (%)	σ_f (MPa)	E_m (GPa)	Distribuição de Probabilidade
Concreto	20	26,6	10	4	24	Normal
Aço	500	598,4	5	59,8	210	Normal
PRFC	3100,5	3400,0	5	170	230	LogNormal

3. Validação do modelo

Como forma de validar o modelo determinístico das vigas estudadas, foram calculados os índices de confiabilidade β , através do método *FORM*, a fim de comparar com os resultados obtidos por Paliga [6]. Na Tabela 3 são apresentados os valores alcançados pelo autor em sua análise probabilística utilizando o método de simulação de Monte Carlo. Vale ressaltar que, o índice de confiabilidade β possui valores adimensionais.

Tabela 3: Resultado dos Índices de Confiabilidade (β) da análise probabilística das vigas de Paliga [6].

Redução na armadura (A_s)	Vigas	V1	V2	V3
10%	Referência	5,11	4,85	5,45
	Danificada	4,49	4,25	4,75
	Recuperada	5,15	5,69	6,37
20%	Referência	5,11	4,85	5,45
	Danificada	3,82	3,87	4,23
	Recuperada	5,11	5,17	6,41
30%	Referência	5,11	4,85	5,45
	Danificada	3,04	2,93	3,06
	Recuperada	5,69	5,61	7,32

A partir dos resultados obtidos por Paliga [6], tabela 3, pode-se constatar que as vigas de referência apresentaram resultados satisfatórios para os índices de confiabilidade (β), visto que, o Eurocode CEN ENV [10] fornece o valor de referência para β de 3,8, com uma correspondente de probabilidade de falha de $7,2 \times 10^{-5}$. Este é um valor considerado de referência para projetos de prédios residenciais, comerciais, hotéis e escolas, para o Estado Limite Último com período de vida útil de 50 anos. Para as vigas de referência os índices de confiabilidade ficaram entre 4,85 e 5,45, valores bem superiores ao valor de referência ($\beta = 3,8$). Quando as vigas foram submetidas às reduções de 10%, 20% e 30% na área da seção transversal da armadura longitudinal de tração, os índices de confiabilidade sofreram decréscimos quase que lineares com o aumento do dano da armadura. Por consequência disso, houve um aumento na probabilidade de falha das vigas danificadas em relação às vigas de referência. Se tratando das vigas recuperadas, o reforço mostrou-se satisfatório, visto que os índices de confiabilidade obtidos pelo autor, foram superiores em relação às vigas de referência.

4. Aplicação do método form para análise probabilística das vigas

Para a realização da análise de confiabilidade do presente trabalho, foi utilizado como fatores as variáveis aleatórias R (resistência) e S (solicitação). O cálculo do momento resistente das vigas, M_R , foi feito através da equação 3. Utilizou-se como variáveis aleatórias os seguintes parâmetros: resistência à compressão do concreto (f_{ck}), a tensão de escoamento do aço (f_s), a tensão de escoamento do reforço (f_{re}), a área de aço (A_s) e os carregamentos permanente e variável da viga.

A distribuição de probabilidade adotada para o carregamento permanente foi do tipo normal e como coeficiente de variação foi adotado o valor de 10%. Para a parcela de carga variável adotou-se a distribuição de valores extremos do tipo I e coeficiente de variação de 25 %. As distribuições de probabilidade das variáveis relacionadas à resistência foram consideradas todas normais, exceto da resistência do laminado de PRFC, que foi adotado lognormal, com coeficiente de variação de 5%. A análise foi realizada com base nas planilhas de Low e Tang [11] para solução do método *FORM*. A equação (Eq. 4) para o cálculo da função, $g(x)$, foi a seguinte:

$$g(x) = M_R - M_S \quad (4)$$

onde, M_R é o momento resistente da peça, calculado através da equação 3 e o M_S é momento solicitante, igual a soma dos carregamentos permanente e variável.

Os resultados obtidos através do método *FORM* e com auxílio de uma planilha eletrônica, para os índices de confiabilidade (β) são apresentados na tabela 4. O valor adotado para o índice de confiabilidade de referência $\beta_{alvo} = 3,8$, valor adotado por Paliga [6] e seguindo as recomendações da Eurocode CEN ENV [10] para estruturas de concreto armado com vida útil de 50 anos.

Tabela 4: Resultado da análise através do método *FORM* para os Índices de Confiabilidade (β) das vigas estudadas

Redução na armadura (A_s)	Vigas	V1	V2	V3
10%	Referência	4,12	4,27	4,46
	Danificada	3,57	3,71	3,92
	Recuperada	4,69	4,77	4,90
20%	Referência	4,12	4,27	4,46
	Danificada	2,89	3,06	3,30
	Recuperada	4,49	4,44	5,06
30%	Referência	4,12	4,27	4,46
	Danificada	2,11	2,30	2,53
	Recuperada	4,66	4,60	5,57

Com base nos resultados obtidos, verificou-se que o modelo adotado se mostrou satisfatório, visto que as vigas de referência, ou seja, que não receberam reforço, obtiveram índices de confiabilidade superiores ao índice $\beta_{alvo} = 3,8$, e correlacionando com os resultados obtidos por Paliga [6], os resultados mostram-se similares. Em relação as vigas danificadas com 10%, 20% e 30% da redução da área de aço da

armadura transversal, observou-se que alguns dos índices de confiabilidades ficaram abaixo do β_{alvo} , uma diferença em comparação aos resultados obtidos no modelo de Paliga [6], onde apenas as vigas danificadas em 30% ficaram abaixo do $\beta_{alvo} = 3,8$. Entretanto, no que se refere as vigas danificadas em 30% da armadura de tração, os resultados foram semelhantes ao do autor, dado que foi onde houve uma queda mais expressiva nos índices de confiabilidade, gerando uma maior probabilidade de falha e indicando um baixo grau de segurança das vigas danificadas.

Com relação as vigas recuperadas, em todas as situações os resultados foram satisfatórios, visto que os índices de confiabilidade ficaram acima do $\beta_{alvo} = 3,8$, e também acima dos índices de confiabilidade das vigas de referência, resultados similares aos obtidos por Paliga [6].

5. Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo apresentar uma avaliação dos índices de confiabilidade β obtidos através do método *FORM* para as vigas de Paliga [6] e compará-los aos resultados de confiabilidade atingidos pelo autor, como forma de validar o modelo utilizado.

Analisando os resultados obtidos, a princípio, das vigas danificadas em relação as vigas recuperadas, verificou-se que o projeto de recuperação das peças com o uso do PRFC, foi eficiente, visto que os índices de confiabilidade obtidos para as vigas reforçadas atingiram não só o valor de referência do índice de confiabilidade β , como atingiram valores superiores em relação as vigas de referência. Se tratando das vigas danificadas não terem atingido o valor de referência para o índice de confiabilidade $\beta_{alvo} = 3,8$, logo, nota-se a importância de uma intervenção de recuperação estrutural quando uma estrutura chega a um certo grau de deterioração.

Portanto, pode-se concluir com a análise dos resultados, que a utilização do método *FORM* para a geração dos dados mostrou-se satisfatória, dado que os resultados obtidos ficaram similares aos obtidos por Paliga [6] que realizou sua análise probabilística através do método dos elementos finitos e pela simulação de Monte Carlo.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo e ao CNPQ pela bolsa de produtividade de pesquisa do 3ª autor.

7. Referências

- [1] LOPES, Paulo André M.; REAL, Mauro de V. Aplicação dos métodos FORM e Monte Carlo na avaliação da confiabilidade de vigas de concreto armado recuperadas com PRFC. In: SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA, 4., 2010, Rio Grande. 4º Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, FURG. Rio Grande/rs: Universidade Federal de Rio Grande, 2010. p. 1 - 16.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118/2014: *Projeto de estruturas de concreto - Procedimento*. ABNT: Rio de Janeiro, 2014.
- [3] NÁRVAEZ, N. S. *Projeto baseado em Confiabilidade de Vigas em concreto armado com e sem Reforço de Compósitos de Fibras de carbono*. 2012. Dissertação de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2012.
- [4] ANG, A. H-S; TANG, W.H. *Probability concepts in engineering planning and design. Volume I: basic principles*. New York, John Wiley & Sons, 1975.
- [5] SOUZA, O. L. de C. *Aplicação da Teoria da Confiabilidade às vigas de concreto armado reforçadas à torção com compósito de fibras de carbono*. 2011. 191p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2011.
- [6] PALIGA, C.M., CAMPOS FILHO, A. & REAL, M. V. *Confiabilidade Estrutural de Vigas de concreto armado danificadas e recuperadas com lâminas de PRFC*. Revista Teoria e Prática na Engenharia Civil. n. 12, p.49-58, 2008.
- [7] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – *Guide the design and construction of externally bonded frp systems for strengthening concrete structur* - ACI Committee 440 -, Detroit, Michigan, julho de 2000.
- [8] FORTES, A. S.; PADARATZ, I. J.; BARROS, J. A. O. de. *Projeto de reforço à flexão com FRP baseado nas recomendações do ACI 440*. In: Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, 2002, Brasília, DF. XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural. Brasília, DF: Universidade de Brasília - Unb, 2002. p. 1 - 19.
- [9] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. *Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures. (bulletin 14)*, Lausanne, Switzerland, 2001.
- [10] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. *Basis of Design and Actions on Structures - Part 1: Basis of Design*. CEN ENV 1991-1, 1994.
- [11] LOW, B.K.; TANG, W.H. *Efficient Spreadsheet Algorithm for First-Order Reliability Method*. *Journal of Engineering Mechanics*, Journal of Engeneering Mechanics. v 133, n 12, 2007. DOI: 10.1061/(ASCE)0733 9399(2007)133:12(1378).