

ANÁLISE DA CONFIABILIDADE EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS COM PRFC ATRAVÉS DO MÉTODO FORM

Mara Bruna Silveira Muniz (Discente Pós-Graduação – FURG) - E-mail: mbrunamuniz@gmail.com
Francisco Eudázio Suriano da Silva Júnior (Discente Pós-Graduação – FURG) - E-mail: jrsuri@outlook.com
Mauro de Vasconcellos Real (Prof. Dr. - FURG) E-mail: 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 comprometendo o seu desempenho, ou mesmo levando a deterioração e ruína da estrutura. 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. Para validação do modelo determinístico das vigas, foram calculados os índices de confiabilidade β , tendo como referência o valor de 3,8 para β , a fim de comparar com os resultados obtidos por Paliga (2008). 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, seguindo as recomendações da *fib* bulletin 14, 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. Portanto, pode-se concluir com a análise dos resultados, a utilização do método FORM para a geração dos dados mostrou-se satisfatória, dado que os resultados obtidos ficaram similares aos obtidos por Paliga (2008) que realizou sua análise probabilística através dos elementos finitos e pela simulação de Monte Carlo.

Palavras-chave: Confiabilidade, Recuperação Estrutural, PRFC.

ANALYSIS OF RELIABILITY IN REINFORCED CONCRETE BEAMS STRENGTHENED WITH CFRP THROUGH THE FORM METHOD

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, or even leading to deterioration and ruin of the structure. The fundamental requirements for a building to be considered suitable for its use include safety, functionality, and durability. Precisely in this bias is the aim of the present work, 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, using as reference the value of 3.8 for β , in order to compare the results obtained in this study with the results obtained by Paliga (2008). Analyzing the results of the damaged beams in relation to the recovered beams, it was verified that the specimens recovery project, using CFRP and following the recommendations of *fib* bulletin 14, was efficient, since the reliability indexes obtained for the reinforced beams reached not only the reference value of the reliability index β , but also reached higher

values in relation to the reference beams. Therefore, it can be concluded from the analysis of the results that the use of the FORM method for data generation was satisfactory, since the results obtained were similar to those obtained by Paliga (2008), 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, das quais, elevada resistência à tração, baixo peso, facilidade de manuseio e de aplicação, e boa imunidade à corrosão (Lopes e Real, 2010).

O dimensionamento de estruturas de concreto armado é feito no Brasil seguindo os preceitos da norma da ABNT NBR 6118/2014. Segundo Narváes (2012), a norma brasileira, como a maioria das normas do mundo, segue a metodologia de dimensionamento semi-probabilístico. Nesse método, as expressões dos estados limites são escritas com as variáveis aleatórias representadas por valores chamados de valores de cálculo ou de projeto que são valores com baixa probabilidade de ocorrência, no sentido 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 no sentido de levar a um projeto com probabilidade de falha, respectivamente, acima ou abaixo da probabilidade de falha desejada. 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.

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), uma estrutura, ou parte dela, atinge um estado limite quando se torna inutilizável ou quando deixa de atender os requisitos para a qual foi projetada. 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.

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 (Narváes, 2012).

O objetivo da análise probabilística de estruturas é determinar o efeito da dispersão dos parâmetros de projeto no seu comportamento final, tornando-se, desta maneira, uma ferramenta de análise da confiabilidade alcançada no projeto de uma estrutura (Paliga, 2008).

Segundo Ang e Tang (1975), 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 (ANG e TANG, 1975), 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), a qual a estrutura é submetida, ou seja,

$$M = R - S \quad (2.1)$$

Sabidas as distribuições de probabilidade de R e S , é possível determinar a distribuição de probabilidade da margem de segurança M . Definida a variável aleatória M , e esta tendo uma distribuição normal de probabilidade, o índice de confiabilidade, que é um indicativo do grau de segurança contra a falha ou ruína da estrutura, é obtido pela relação entre o valor médio (μ_M) e o desvio padrão (σ_M) da margem de segurança, ou seja:

$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} \quad (2.2)$$

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:

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (2.3)$$

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

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	$0,621 \times 10^{-2}$
3,0	$0,135 \times 10^{-2}$
3,5	$0,233 \times 10^{-3}$
4,00	$0,317 \times 10^{-3}$

Fonte: Souza (2011, apud Porto, 2016)

A partir da figura 1, observa-se que um aumento no valor de β implica em uma redução da área hachurada, concluindo-se que, quanto maior for o índice de confiabilidade de uma estrutura em relação a um certo Estado Limite, menor será sua probabilidade de falha em relação a esta situação, o que caracteriza este como um parâmetro útil para comparar o nível de segurança atingido no projeto de diversas estruturas (REAL, 2000, apud Barbosa, 2017).

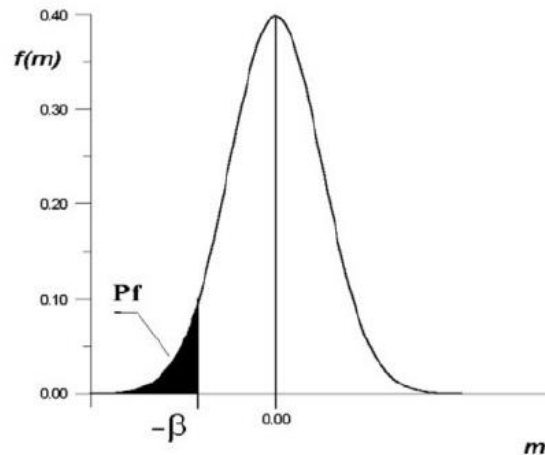


Figura 1 - Variável aleatória margem de segurança padronizada m de distribuição normal e índice de confiabilidade β .

Fonte: Real (2000, apud Barbosa, 2017).

2.2 Modelo determinístico para cálculo da capacidade resistente da viga estudada

Para determinar a capacidade resistente das vigas de Paliga (2008), 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.

Para se obter as amostras de resistência da viga de concreto armado reforçada com PRFC, ou seja, as cargas de ruptura, primeiramente foram geradas as resistências dos materiais (concreto, aço e PRFC) e a máxima tensão de aderência concreto/reforço. Para obter a média (μ) e desvio padrão (σ) do concreto foram utilizadas as seguintes equações:

$$\mu_{fc} = \frac{f_{ck}}{1 - 1,65 \cdot V_{fc}} \quad (2.4)$$

$$\sigma_{fc} = \mu_{fc} \cdot V_{fc} \quad (2.5)$$

sendo, V_{fc} , é o coeficiente de variação da resistência à compressão do concreto. A fim de calcular a média (μ) e desvio padrão (σ) do aço, foi utilizado as equações a seguir:

$$\mu_{fy} = 1,09 \cdot f_{yk} \quad (2.6)$$

$$\sigma_{fy} = \mu_{fy} \cdot V_{fy} \quad (2.7)$$

onde, V_{fy} , é o coeficiente de variação da tensão de escoamento do aço.

A capacidade nominal de resistência à flexão da seção de um elemento reforçado com FRP 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 2 ilustra a distribuição de deformações e de tensões utilizada pelo Código do ACI 440 na verificação do equilíbrio interno de forças (Fortes, Padaratz e Barros, 2002).

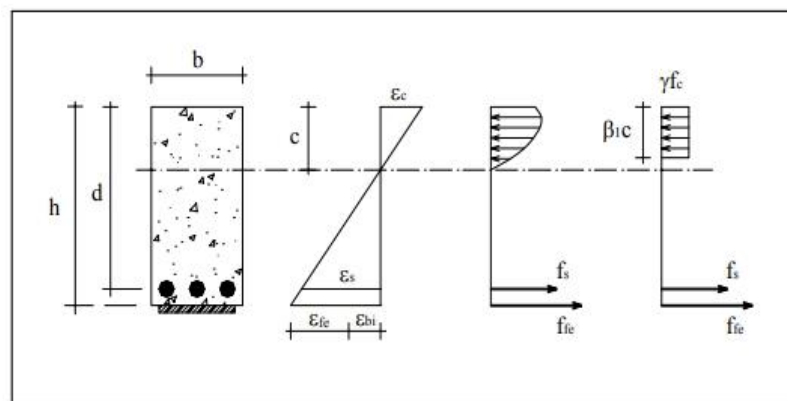


Figura 2 - Distribuição de deformações e de tensões na seção, no estado limite último – ELU.

Fonte: Fortes, Padaratz e Barros (2002)

A capacidade nominal de flexão da seção no estado limite último, considerando-se a distribuição de deformações e de tensões apresentadas na Figura 2.2, pode ser obtida através da equação 2.7.

$$M_R = A_s * f_s * \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f * A_f * f_{fe} * \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (2.7)$$

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 FRP. Na flexão pode-se considerar igual a 0,85.

A_f é a área de FRP;

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

De acordo com o *Committee 440 da ACI*, os estudos experimentais têm revelado que não é econômico a utilização de um número elevado de camadas de FRP, dado que a eficiência do reforço diminuí com o número de camadas de FRP, ocorrendo a rotura na interface substrato-FRP, não se mobilizando a capacidade resistente do FRP. Assim, o ACI ao recomendar que a deformação última de projeto do FRP 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 (2012), 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.

Se essa dada função de estado limite para o espaço original é $G(X)=0$, a mesma será escrita, para o espaço normal padrão, em função das variáveis normais equivalentes padronizadas, ou seja, $G(U)=0$. Assim, o índice de confiabilidade β será calculado pela menor distância entre a superfície de falha no espaço normal padrão $G(U)=0$, e a origem deste sistema (Paliga, 2008).

Para o presente trabalho utilizou-se o método de confiabilidade de primeira ordem (FORM) para 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 (2008)

Para realização da análise da confiabilidade de vigas de concreto armado reforçadas com laminado de fibra de carbono, analisou-se as vigas de Paliga (2008). O autor projetou três vigas biapoiadas, com seção transversal retangular de 12 cm x 40 cm, vão de 4,00 m, e que foram submetidas a uma carga uniformemente distribuída. As propriedades geométricas, configuração do carregamento e armaduras, são apresentadas através da figura 4. As vigas foram projetadas seguindo-se os preceitos da NBR 6118/2014.

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

(2008) foram projetados seguindo as recomendações da *fib* bulletin 14, em lâminas de PRFC colados na face tracionada das vigas, a fim de recuperar a capacidade de carga original da peça.

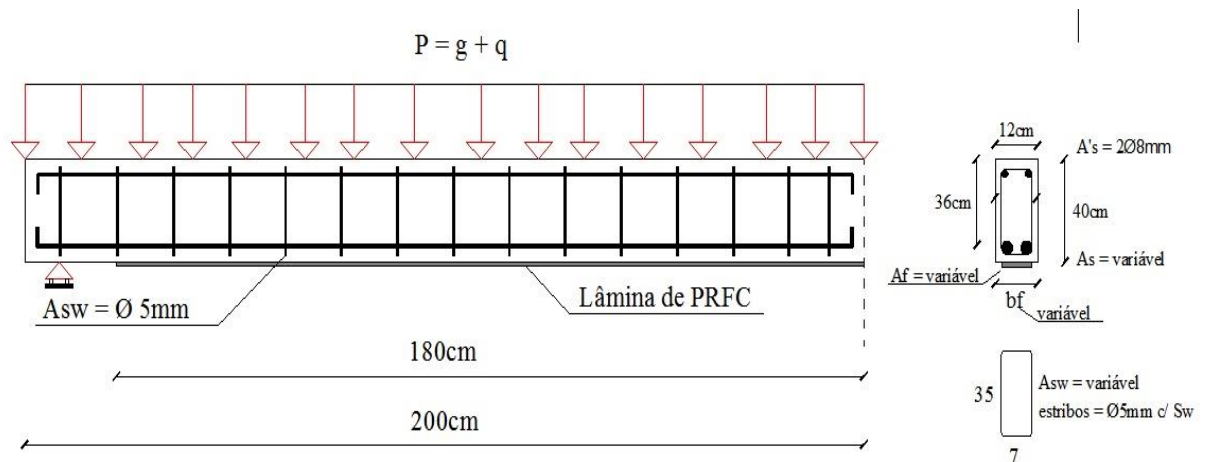


Figura 4 – Detalhamento da viga estudada.

Fonte: Paliga (2008).

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 da viga em estudo

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	3099,5	3400	5	170	230	LogNormal

Fonte: Paliga (2008).

3. VALIDAÇÃO DO MODELO

Para validação do modelo determinístico das vigas, foram calculados os índices de confiabilidade β , a fim de comparar com os resultados obtidos por Paliga (2008). Na tabela 3 são apresentados os valores obtidos pelo autor em sua análise probabilística utilizando o método de simulação de Monte Carlo.

Tabela 3 – Resultado dos Índices de Confiabilidade (β) da análise probabilística das vigas de Paliga (2008)

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

Fonte: Paliga (2008).

A partir dos resultados obtidos por Paliga (2008), 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 1991-1 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 foram superiores em relação as vigas de referência.

4. APLICAÇÃO DO MÉTODO FORM PARA ANÁLISE PROBABILÍSTICA DAS VIGAS

Para 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 2.7 (apresentada neste trabalho). 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_{fe}), 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 (2007) para solução do método FORM. A equação para o cálculo da função, $g(x)$, foi a seguinte:

$$g(x) = M_R - M_S \quad (2.8)$$

onde, M_R é o momento resistente da peça, calculado através da equação 2.7 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 (2008) e seguindo as recomendações da Eurocode CEN ENV 1991-1 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

Fonte: Autor, 2019.

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 (2008), 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 (2008), 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 (2008).

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 (2008) 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, seguindo as recomendações da *fib* bulletin 14, 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 de as 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, a utilização do método FORM para a geração dos dados mostrou-se satisfatória, dado que os resultados obtidos ficaram similares aos obtidos por Paliga (2008) que realizou sua análise probabilística através dos elementos finitos e pela simulação de Monte Carlo.

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 3^a autor.

Referências

- 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.
- ANG, A. H-S; TANG, W.H.** *Probability concepts in engineering planning and design. Volume I: basic principles.* New York, John Wiley & Sons, 1975.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118/2014:** *Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.* ABNT: Rio de Janeiro, 2014.
- BARBOSA, P.R.O.** *Análise probabilística de pilares de concreto armado através do método dos elementos finitos.* 2017. Dissertação de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2017.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION.** *Basis of Design and Actions on Structures - Part 1: Basis of Design.* CEN ENV 1991-1, 1994.
- FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON.** *Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures. (bulletin 14),* Lausanne, Switzerland, 2001.
- 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.
- LOW, B.K.; TANG, W.H.** *Efficient Spreadsheet Algorithm for First-Order Reliability Method.* *Journal of Engineering Mechanics,* Journal of Engineering Mechanics. v 133, n 12, 2007. DOI: 10.1061/(ASCE)0733 9399(2007)133:12(1378).
- 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.
- 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.
- PORTO, N. G. de O.** *Análise Paramétrica do comportamento de elementos de membrana aplicada a Estruturas de concreto armado via Confiabilidade Estrutural.* 2016. 83p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Uniceub– Centro Universitário de Brasília, Brasília, DF, 2016.
- REAL, M. V.** *Análise probabilística de estruturas de concreto armado, sob estado plano de tensão, através do método dos elementos finitos.* 2000. 224p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2000.
- 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.