

Estudo da confiabilidade de vigas de concreto armado deterioradas pela agressividade do ambiente marítimo

Charlei M. Paliga¹, Mauro V. Real² & Américo Campos Filho³

¹Departamento de Materiais e Construção – FURG, Rio Grande, RS –
charlei.paliga@ufrgs.br

²Departamento de Materiais e Construção – FURG, Rio Grande, RS – mauro@dmc.furg.br

³Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PPGEC-UFRGS, Porto Alegre, RS –
americo@ufrgs.br

RESUMO: O objetivo deste trabalho é fazer a análise da confiabilidade estrutural de vigas de concreto armado que sofreram corrosão da armadura tracionada, devido à sua localização em ambiente agressivo, como zonas marítimas, e que foram recuperadas pela colagem de lâminas de PRFC projetadas de acordo com a *fib* bulletin 14 “*Externally bonded FRP reinforcement for RC Structures*”. Para a avaliação da confiabilidade destas vigas foi empregado o método de Monte Carlo juntamente com um modelo não-linear de elementos finitos. Os resultados mostraram que nos casos das vigas analisadas a confiabilidade das vigas deterioradas pode cair a níveis inaceitáveis, sendo que o projeto de recuperação estrutural pode fazer com que a confiabilidade seja igualada ou aumentada em relação às vigas em situação não-deteriorada.

PALAVRAS-CHAVE: recuperação estrutural, vigas de concreto armado, confiabilidade estrutural, método dos elementos finitos, PRFC.

ABSTRACT: This work aims at studying the reliability of reinforced concrete beams that suffered corrosion in the tensioned reinforcement, due to its localization in aggressive environment, like marine zones. These beams were rehabilitated by the CFRP sheets bonded in their tensioned faces, designed according to the recommendations of *fib* bulletin 14 “*Externally bonded FRP reinforcement for RC Structures*”. In order to evaluate the reliability of these beams it was employed the Monte Carlo method with a nonlinear finite element model. The results showed that the reliability of the damaged RC beams can fall to unacceptable levels, and the design of structural rehabilitation can lead to reliability equal to or higher than the undamaged RC beams reliability.

KEYWORDS: Structural rehabilitation, RC beams, structural reliability, finite element method, CFRP.

1. INTRODUÇÃO

A durabilidade das estruturas de concreto armado é um assunto em evidência nos dias atuais. Desta maneira, a nova versão da norma NBR 6118:2003 [4] demonstra uma preocupação especial com a deterioração prematura das estruturas, observando-se alguns critérios importantes que devem ser considerados nas fases de projeto, de execução e quando da sua utilização. Entretanto, fatores como concreto de má qualidade e cobrimento inadequado das armaduras podem contribuir para que a vida útil de uma estrutura de concreto armado seja

abreviada, devido ao seu estado de deterioração, colocando em risco a sua utilização. Por esse motivo, dois caminhos podem ser seguidos: 1) Demolição da estrutura existente e construção de uma nova estrutura; 2) Recuperação das suas condições iniciais. Devido aos transtornos e ao alto custo de uma demolição e reconstrução da estrutura, além do tempo necessário para que isso seja feito, a sua recuperação torna-se uma solução menos traumática. Existe hoje uma técnica de recuperação ou reforço de estruturas de concreto que cresce cada vez mais na indústria da construção civil. Trata-se do emprego de materiais compósitos à base de fibras e resinas, os chamados Polímeros Reforçados com Fibras (PRF), ou especificamente os Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono (PRFC). Estes materiais destacam-se por sua elevada resistência à tração, baixo peso, facilidade de aplicação e imunidade à corrosão.

Embora já existam normas de projeto de reforço estrutural usando polímeros reforçados com fibras provenientes dos Estados Unidos [1], Europa [6] e Japão [9], no Brasil ainda não se dispõe de uma norma técnica sobre este assunto. Então, o projetista brasileiro de reforço ou recuperação de estruturas acaba sendo obrigado a seguir as recomendações das normas internacionais e de catálogos de fabricantes de fibras de carbono.

No entanto, fica a seguinte pergunta: qual o nível de segurança (confiabilidade) alcançado no projeto de reforço ou recuperação de vigas de concreto armado com o emprego de materiais compósitos à base de fibras de carbono?

O objetivo deste trabalho é contribuir para a resposta da pergunta acima, fazendo a análise da confiabilidade estrutural de vigas de concreto armado que sofreram corrosão da armadura tracionada, devido à sua localização em ambiente agressivo, como zonas marítimas, e que foram recuperadas pela colagem de lâminas de PRFC projetadas de acordo com a *fib* bulletin 14 [6].

Para a análise da segurança estrutural foi usado o método de simulação de Monte Carlo juntamente com um modelo não-linear de elementos finitos. Inicialmente, foram atribuídas distribuições de probabilidade apropriadas para as propriedades do concreto, aço, PRFC e para a interface entre a viga e o PRFC, assim como para o carregamento. Um conjunto de dados de entrada foi gerado aleatoriamente de acordo com as distribuições de probabilidade prescritas. Cada viga foi, então, analisada com o modelo de elementos finitos até a ruptura. Os resultados de cada análise, chamada de simulação, foram armazenados. Este procedimento foi repetido 1.000 vezes, obtendo-se a convergência estatística dos resultados.

Os resultados mostraram que nos casos das vigas analisadas a confiabilidade das vigas deterioradas pode cair a níveis inaceitáveis, sendo que o projeto de recuperação estrutural pode fazer com que a confiabilidade seja igualada ou aumentada em relação às vigas em situação não-deteriorada.

2. FORMULAÇÃO PARA A ANÁLISE DA CONFIABILIDADE

Devido à presença de incertezas no desempenho real das estruturas, ou seja, devido a impossibilidade de prever com exatidão a resistência dos materiais na estrutura construída, as propriedades geométricas finais e o carregamento ao qual as estruturas serão submetidas, a confiabilidade estrutural somente pode ser avaliada em termos probabilísticos.

Uma das formas de se avaliar o nível de segurança (confiabilidade) atingido no projeto de uma estrutura é determinar o índice de confiabilidade β e a correspondente probabilidade de falha, P_f , associada a β [3].

Para a definição do índice de confiabilidade β é necessário, primeiramente, estabelecer uma função de estado limite, ou margem de segurança M [3], como sendo a diferença entre a resistência R (carga de ruptura) da estrutura, e a solicitação ou efeito da solicitação, S , à qual a estrutura é submetida, ou seja:

$$M = R - S = R - (g + q) \quad (1)$$

onde g representa a parcela permanente do carregamento, e q a carga variável.

Uma vez definida a variável aleatória margem de segurança M , e tendo esta uma distribuição normal de probabilidade, o índice de confiabilidade β , que é um indicativo do grau de segurança contra a falha ou ruína da estrutura, é dado pela relação entre o valor médio (μ_M) e o desvio padrão (σ_M) da margem de segurança, ou seja:

$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} \quad (2)$$

A probabilidade de falha P_f , para uma estrutura que possua uma margem de segurança com distribuição normal será calculada através da equação:

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (3)$$

onde Φ é a função de probabilidade acumulada da margem de segurança.

3. DESCRIÇÃO DAS VIGAS ANALISADAS

Para a avaliação da confiabilidade alcançada no projeto de recuperação à flexão de vigas de concreto armado, de acordo com as especificações da *fib* bulletin 14 [6], foram analisadas três vigas. Estas vigas são biapoiadas, com uma seção transversal retangular de 12 cm x 40 cm, com 4,00 m de vão, e foram submetidas a uma carga uniformemente distribuída, conforme é ilustrado pela Figura 1.

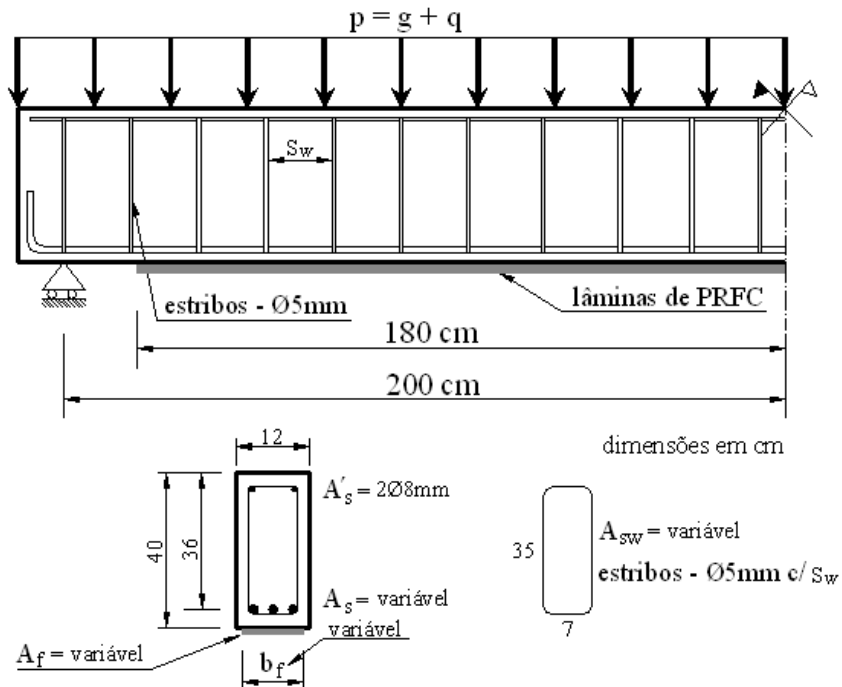


Figura 1 – Detalhes das vigas analisadas

As vigas designadas por V1, V2 e V3, foram submetidas a cargas de serviço $p_k = g_k + q_k$, respectivamente iguais a 10 kN/m, 15 kN/m e 20 kN/m. Sendo g_k a carga permanente e q_k a carga variável. Uma relação $g_k/(g_k+q_k)$ igual a 0,75 foi considerada.

As propriedades mecânicas dos materiais das vigas V1, V2 e V3, são apresentadas na Tabela 1, onde f_k é o valor característico da resistência, f_m é o valor médio da resistência, σ_f é o desvio padrão da resistência, V_f é o coeficiente de variação da resistência, E_m é o valor médio do módulo de elasticidade do material, e a distribuição de probabilidade adotada para a resistência do material é indicada na última coluna da direita.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas dos materiais

Materiais	f_k	f_m	σ_f	V_f	E_m	Distribuição Probabilidade
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	%	[GPa]	
Concreto	20	26,6	4,0	15	29,77	Normal
Aço - CA-50	500	598,4	59,8	10	210	Normal
Aço - CA-60	600	718,1	71,8	10	210	Normal
PRFC	3099,5	3400	170	5	230	Weibull

Na Tabela 2 são apresentadas as armaduras de flexão e de cisalhamento das vigas V1, V2 e V3.

Tabela 2 - Armaduras de flexão e de cisalhamento das vigas V1, V2 e V3

Viga	M_d	A_s	ρ	A_s'	V_d	A_{sw}	S_w
	[kN.m]	[cm ²]	As/b.d	[cm ²]	[kN]	[cm ² /m]	[cm]
V1	28	1,95	0,45%	1,00	28	1,87	21
V2	42	3,08	0,71%	1,00	42	1,87	21
V3	56	4,37	1,01%	1,00	56	1,96	20

A corrosão das armaduras que ocorre nas estruturas de concreto é um processo que implica na perda progressiva de seção das barras de aço. É importante destacar que a corrosão é um processo evolutivo e tende a se agravar com o tempo. Em estágios avançados ela compromete a segurança estrutural, podendo resultar em colapso das estruturas de concreto afetadas [8]. Para que o processo de corrosão das armaduras do concreto armado seja evitado, é importante que se faça uso de um concreto de boa qualidade, com alto grau de compactidade e baixo índice de vazios, e que se garanta um cobrimento mínimo das armaduras. A NBR 6118:2003 [4] fornece valores nominais para o cobrimento das armaduras em função do nível de agressividade do ambiente no qual às estruturas estão inseridas. A mesma norma classifica zonas marítimas e com respingos de maré em classes III (forte) e IV (muito forte) de agressividade ambiental, respectivamente. Deste modo, para vigas localizadas em ambientes marítimos o menor cobrimento admissível das armaduras é igual a 40 mm.

Pela observação da Figura 1, nota-se um cobrimento inferior a 40 mm das armaduras, possibilitando o ataque de cloretos, que causa corrosão da armadura tracionada de flexão com conseqüente perda de área da seção transversal da barra de aço. Como a corrosão é um processo que evoluiu com o tempo, considerou-se neste trabalho, perdas de 10%, 20% e 30% de área das barras tracionadas. Então, seguindo as recomendações da *fib* bulletin 14 [6], foram projetados reforços à flexão, em PRFC colados na face tracionada das vigas, com as propriedades dadas na Tabela 1, recuperando a capacidade resistente original das vigas. As Tabelas 3, 4 e 5 apresentam as áreas da armadura de flexão, já descontadas as perdas, bem

como a área de reforço em PRFC necessária em cada caso, para repor a capacidade resistente inicial de cada viga.

Tabela 3 - Áreas de aço reduzidas e área de reforço em PRFC para um dano de 10%

Vigas danificadas	Dano = 0%		Dano = 10%		
	A_s	ρ	A_s	ρ	A_f
	[cm ²]	As/b.d	[cm ²]	As/b.d	[cm ²]
V1	1,95	0,45%	1,76	0,41%	0,0488
V2	3,08	0,71%	2,77	0,64%	0,0733
V3	4,37	1,01%	3,93	0,91%	0,0980

Tabela 4 - Áreas de aço reduzidas e área de reforço em PRFC para um dano de 20%

Vigas danificadas	Dano = 0%		Dano = 20%		
	A_s	ρ	A_s	ρ	A_f
	[cm ²]	As/b.d	[cm ²]	As/b.d	[cm ²]
V1	1,95	0,45%	1,56	0,36%	0,0650
V2	3,08	0,71%	2,46	0,57%	0,0877
V3	4,37	1,01%	3,50	0,81%	0,1687

Tabela 5 - Áreas de aço reduzidas e área de reforço em PRFC para um dano de 30%

Vigas danificadas	Dano = 0%		Dano = 30%		
	A_s	ρ	A_s	ρ	A_f
	[cm ²]	As/b.d	[cm ²]	As/b.d	[cm ²]
V1	1,95	0,45%	1,37	0,32%	0,0980
V2	3,08	0,71%	2,16	0,50%	0,1388
V3	4,37	1,01%	3,06	0,71%	0,2880

Para o carregamento aplicado, considerou-se que a carga permanente possui uma distribuição normal de probabilidade, com valor médio 5% maior que o seu valor característico, e coeficiente de variação de 10%. Admitiu-se que a carga variável obedece a uma distribuição de valores extremos máximos do tipo I (Gumbel), possuindo um coeficiente de variação de 25%, e que seu valor médio seja igual ao seu valor característico [7].

Para cada uma das vigas analisadas, V1, V2 e V3, foram gerados aleatoriamente 1.000 valores para a carga permanente, com uma distribuição normal de probabilidade, e valores médios e coeficientes de variação indicados na Tabela 6. Da mesma maneira, 1.000 valores foram gerados aleatoriamente para a carga variável, com distribuição de valores extremos máximos do tipo I, valores médios e coeficientes de variação mostrados na Tabela 6. A carga total aplicada às vigas foi obtida, então, pela soma da carga permanente mais a carga variável. Para as três vigas, V1, V2 e V3, a distribuição de probabilidade da carga total resultou em uma distribuição normal.

Para a análise das resistências (carga de ruptura) das vigas originais, danificadas e recuperadas, utilizou-se o método de simulação de Monte Carlo juntamente com um modelo não-linear de elementos finitos. O modelo de elementos finitos utilizado está apresentado detalhadamente em Paliga et al. [10] e Paliga [11]. Nas análises das vigas V1, V2 e V3, originais, com três níveis de dano da armadura de tração, e recuperadas pela colagem de PRFC, foram geradas aleatoriamente as propriedades dos materiais conforme as distribuições que lhes foram prescritas, e então, foi obtida a carga de ruptura através do modelo de

elementos finitos. Para cada uma das análises, 1.000 simulações foram feitas, obtendo, deste modo, 1.000 cargas de ruptura.

Tabela 6 - Composição do carregamento aplicado às vigas V1, V2 e V3

Vigas	Carga total	Carga permanente				Carga variável			
	p_k	g_k	g_m	V_g	Distrib.	q_k	q_m	V_q	Distrib.
	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[%]		[kN/m]	[kN/m]	[%]	
V1	10	7,5	7,875	10	Normal	2,5	2,5	25	Extremos Tipo I
V2	15	11,25	11,813	10	Normal	3,75	3,75	25	Extremos Tipo I
V3	20	15	15,750	10	Normal	5	5	25	Extremos Tipo I

4. RESULTADOS DA ANÁLISE PROBABILÍSTICA

4.1. Viga V1

Da análise probabilística, ou seja, através das 1.000 simulações de Monte Carlo, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 7 para a viga V1 original (sem dano da armadura de tração), danificada e após a recuperação estrutural através da colagem de PRFC. Testes de Kolmogorov-Smirnov [2] foram utilizados para verificar se as cargas de ruptura podem ser representadas por uma distribuição normal de probabilidade, sendo que para um nível de significância de 5% e com um número de 1.000 amostras, o valor crítico é de 0,043.

A viga V1 em situação original apresentou uma carga média de ruptura de 21,10 kN/m, com 8,77% de coeficiente de variação, índice de confiabilidade de 5,11 e uma correspondente probabilidade de falha de $1,60 \times 10^{-7}$.

O teste de Kolmogorov-Smirnov [2], com valor de 0,0418, indicou que a carga de ruptura da viga V1 em situação original pode ser representada por uma distribuição normal de probabilidade.

Tabela 7 – Análise probabilística da viga V1

Viga V1	Original	10% de dano		20% de dano		30% de dano	
		Danific.	Recup.	Danific.	Recup.	Danific.	Recup.
R_m [kN/m]	21,10	19,13	21,04	17,04	20,16	14,95	20,18
V_R [%]	8,77	8,68	8,51	8,59	7,91	7,91	7,03
β	5,11	4,49	5,15	3,82	5,11	3,04	5,69
P_f	$1,60 \times 10^{-7}$	$3,60 \times 10^{-6}$	$1,30 \times 10^{-7}$	$6,70 \times 10^{-5}$	$1,60 \times 10^{-7}$	$1,20 \times 10^{-3}$	$6,40 \times 10^{-9}$

4.2. Viga V2

A viga V2 não danificada apresentou uma carga média de ruptura de 32,06 kN/m, com 9,40% de coeficiente de variação. Para o seu índice de confiabilidade obteve-se o valor de 4,85

com correspondente probabilidade de falha de $6,20 \times 10^{-7}$. Com os resultados obtidos da análise probabilística da viga V2, pôde-se construir a Tabela 8 que mostra todos os resultados das situações de análise.

Tabela 8 – Análise probabilística da viga V2

Viga V2	Original	10% de dano		20% de dano		30% de dano	
		Danific.	Recup.	Danific.	Recup.	Danific.	Recup.
R_m [kN/m]	32,06	29,16	32,79	26,09	30,60	23,04	30,66
V_R [%]	9,40	9,30	7,96	8,90	7,81	9,03	7,05
β	4,85	4,25	5,69	3,87	5,17	2,93	5,61
P_f	$6,20 \times 10^{-7}$	$1,10 \times 10^{-5}$	$6,40 \times 10^{-9}$	$5,40 \times 10^{-5}$	$1,20 \times 10^{-7}$	$1,70 \times 10^{-3}$	$1,00 \times 10^{-8}$

4.3. Viga V3

Da análise probabilística da viga V3 obteve-se uma carga média de ruptura de 43,18 kN/m, com 8,51% de coeficiente de variação para sua situação original. Para sua margem de segurança, obteve-se um valor médio de 22,51 kN/m com 4,13 kN/m de desvio padrão. Para o teste de Kolmogorov-Smirnov [2], obteve-se como maior diferença entre a distribuição de freqüência acumulada, obtida através das amostras da carga de ruptura, e a função de probabilidade acumulada admitida como normal, o valor de 0,0197. Como este valor ficou abaixo da maior diferença que pode ser alcançada, e observando-se o histograma da margem de segurança apresentado na Figura 2, e o gráfico de probabilidade normal na Figura 3, pode-se dizer que margem de segurança da viga V3 original segue uma distribuição normal de probabilidade.

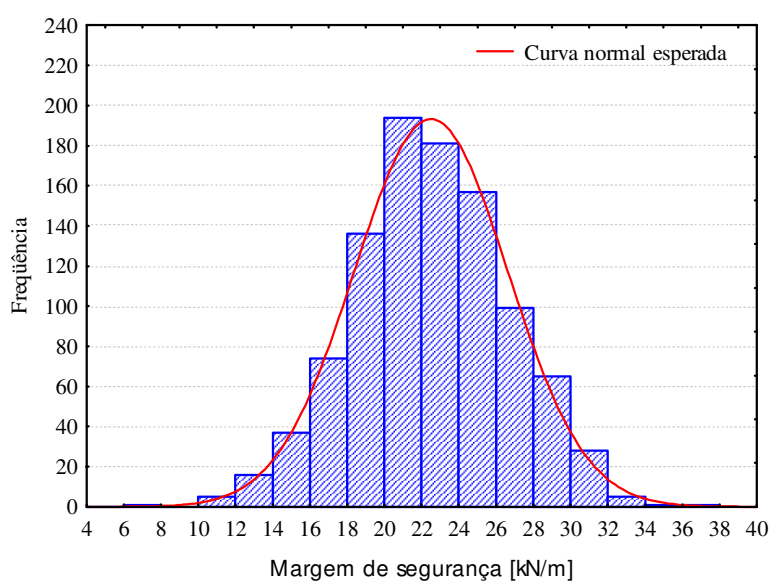


Figura 2 – Margem de segurança: Viga V3 original

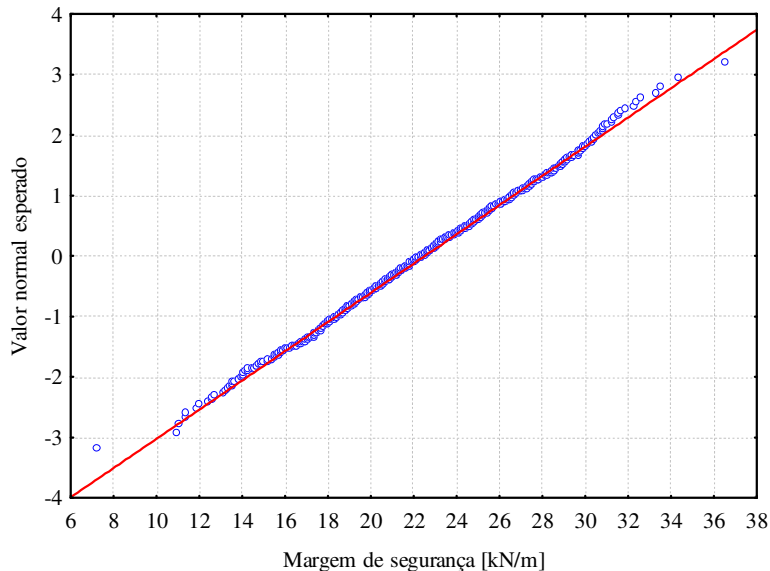


Figura 3 – Gráfico de probabilidade normal: Viga V3 original

Como consequência do dano de 30% aplicado na armadura inferior, houve uma queda de 26,22% na carga média de ruptura em relação à viga V3 original. Assim, a carga média de ruptura ficou em 31,86 kN/m com 9,56% de coeficiente de variação.

A carga média de ruptura aumentou em 41,75% quando da recuperação do dano de 30% da armadura de tração. Com um coeficiente de variação de 5,67%, o valor médio da carga de ruptura foi de 45,16 kN/m. Note-se a proximidade do coeficiente de variação da carga de ruptura com o coeficiente de variação da resistência do PRFC (ver Tabela 1), indicando sua grande influência na ruptura da viga V3 recuperada do dano de 30%. A carga média de ruptura ficou 4,59% maior em relação à viga V3 original, sendo que o coeficiente de variação diminuiu de 8,51% (viga original) para 5,67% (viga recuperada). Uma queda na variabilidade da resposta, fazendo com que o índice de confiabilidade aumentasse. Diminuindo, desse modo, a probabilidade de falha da viga recuperada do dano de 30% em relação à viga original.

Um indicativo de queda na confiabilidade estrutural se obtém quando a função de probabilidade acumulada da resistência, $F_R(r)$, aproxima-se da função densidade de probabilidade do carregamento (ou efeito do carregamento), $f_S(s)$. Este fato é observado nas Figuras 4, 5 e 6. Para a situação original da viga V3, a região de sobreposição entre a função de probabilidade acumulada da resistência e a função densidade de probabilidade da solicitação nos indica uma baixíssima probabilidade de falha.

Por outro lado, fica evidente através da observação das mesmas figuras a gradativa aproximação entre estas duas funções, aumentando a região de sobreposição, e gerando uma queda na confiabilidade estrutural com o aumento do dano da armadura. Desta maneira, é de fácil constatação a queda na confiabilidade das vigas de concreto armado com o dano em suas armaduras tracionadas quando comparadas a sua situação original.

Quando se fez a recuperação das vigas danificadas as funções de probabilidade acumulada da resistência se afastaram novamente da função densidade de probabilidade da solicitação, indicando aumento de confiabilidade em relação às vigas danificadas.

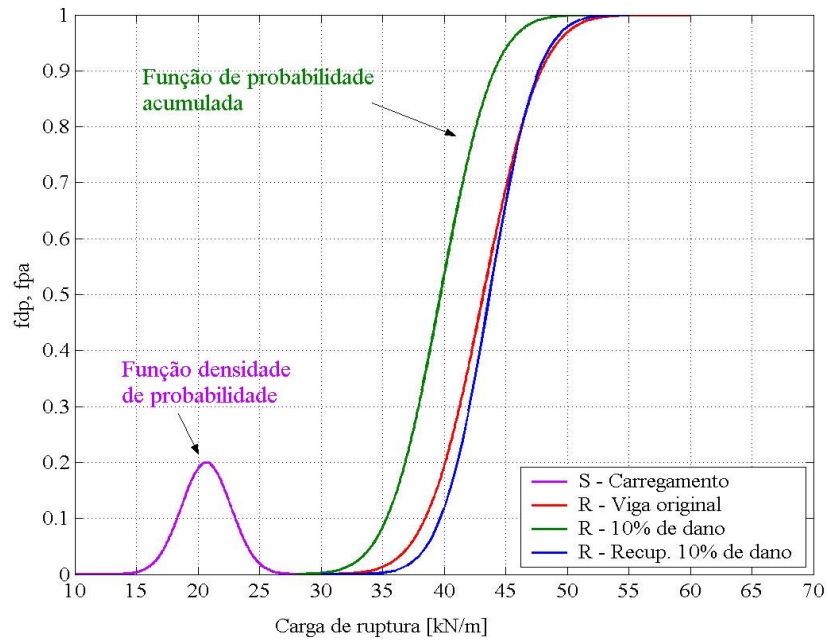


Figura 4 – Representação do problema R - S em termos de $f_S(s)$ e $F_R(r)$ – Viga V3 com 10% de dano

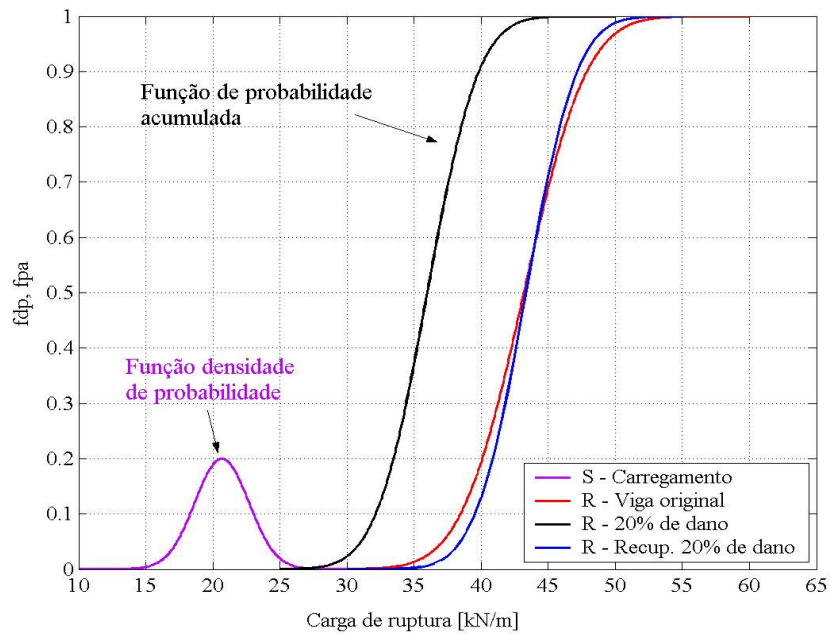


Figura 5 – Representação do problema R - S em termos de $f_S(s)$ e $F_R(r)$ – Viga V3 com 20% de dano

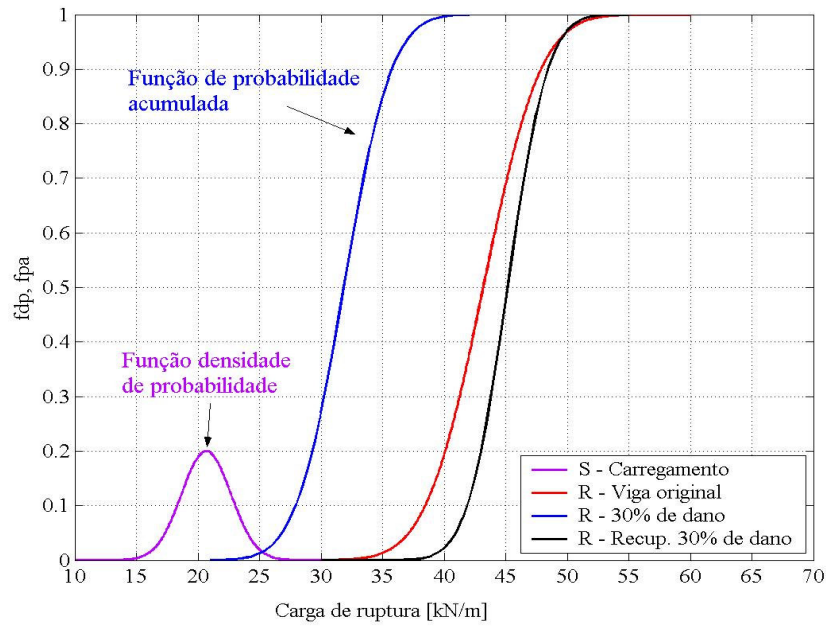


Figura 6 – Representação do problema $R-S$ em termos de $f_S(s)$ e $F_R(r)$ – Viga V3 com 30% de dano

Nas Figuras 7, 8, 9 e 10 são apresentados, respectivamente, a variação com o aumento do dano da armadura de tração da carga média de ruptura e de seu coeficiente de variação, do índice de confiabilidade e da probabilidade de falha.

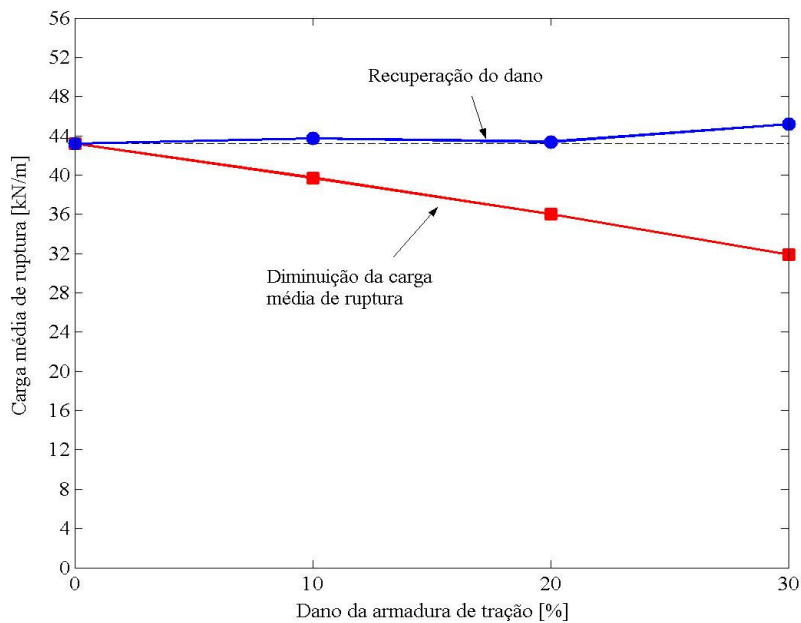


Figura 7 – Variação da carga média de ruptura com o dano: Viga V3

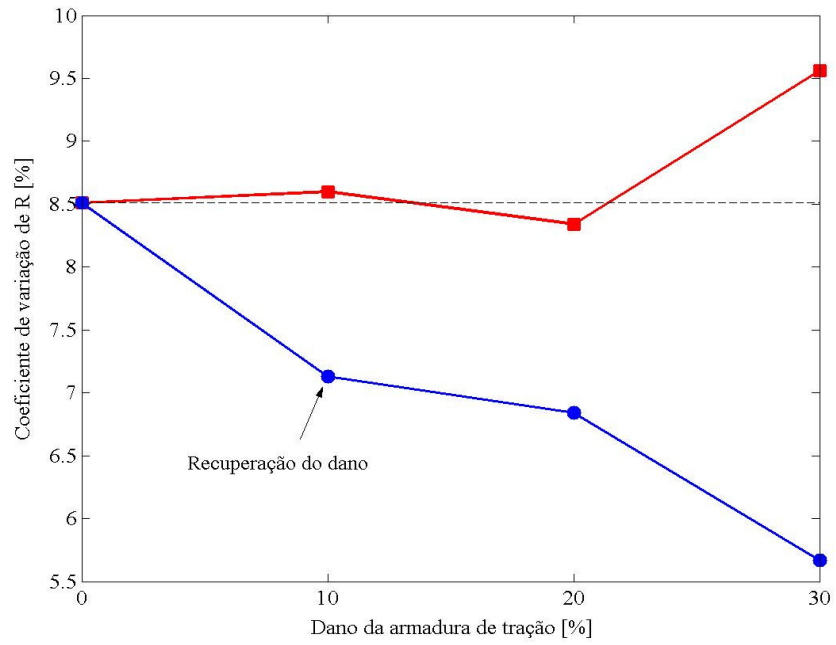


Figura 8 – Coeficiente de variação da carga de ruptura com o dano: Viga V3

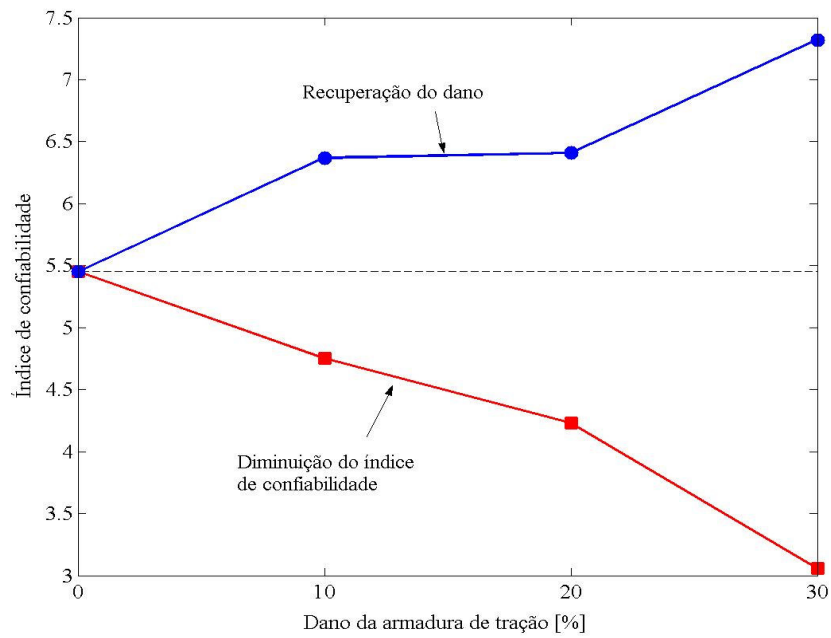


Figura 9 – Variação do índice de confiabilidade com o dano: Viga V3

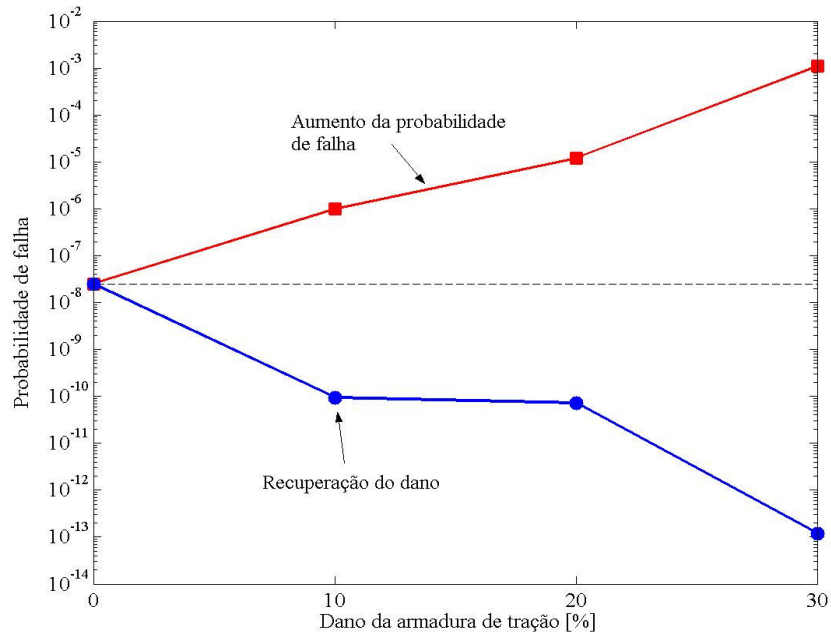


Figura 10 – Variação da probabilidade de falha com o dano: Viga V3

5. CONCLUSÕES

Este artigo teve como objetivo apresentar uma avaliação da segurança estrutural de vigas de concreto armado que foram atacadas pela corrosão, devido a sua localização em ambiente marítimo, que ocasionou perdas de área da armadura tracionada de flexão. Para o restabelecimento das condições iniciais, as vigas foram recuperadas através da colagem de material compósito à base de fibras de carbono e resinas poliméricas para a absorção da parcela dos esforços de tração perdida pelo dano nas barras de aço tracionadas. O projeto da área necessária de PRFC para a sua contribuição na absorção dos esforços de tração foi feito seguindo as recomendações da *fib* bulletin 14 [6].

Após a apresentação dos resultados numéricos obtidos das análises probabilísticas, através das simulações de Monte Carlo juntamente com o modelo não-linear de elementos finitos, se faz necessária uma discussão sobre os resultados obtidos.

Pode-se dizer que a resistência (carga de ruptura) e a margem de segurança das vigas analisadas podem ser representadas por uma distribuição normal de probabilidade.

As vigas não-danificadas apresentaram probabilidades de falha P_f perfeitamente aceitáveis. O Eurocode CEN ENV 1991-1 [5] fornece o valor de referência para β de 3,8, com uma correspondente probabilidade de falha de $7,2 \times 10^{-5}$. Considera-se este valor 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 originais os índices de confiabilidade ficaram entre 4,85 e 5,45, valores bem superiores ao valor de referência.

Quando as vigas foram submetidas às reduções de 10%, 20% e 30% na área da seção transversal da armadura longitudinal de tração, as cargas médias de ruptura diminuíram quase que linearmente, indicando que a queda da carga de ruptura é proporcional ao dano sofrido pela armadura. Os índices de confiabilidade também 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 originais. Quando as vigas sofreram danos de 10% na armadura tracionada, os índices de confiabilidade ficaram entre 4,2 e 4,8, indicando um nível de confiabilidade aceitável quando comparado ao índice de

confiabilidade de referência ($\beta=3,8$). Para os danos de 20% na armadura de tração, V1 e V2 apresentaram índices de confiabilidade muito próximos ao valor de referência, respectivamente 3,82 e 3,87. Entretanto, os casos onde a queda na confiabilidade foi mais pronunciada aconteceram para o dano de 30% da armadura de tração, onde o índice de confiabilidade ficou entre 2,9 e 3,10, gerando uma probabilidade de falha da ordem de 10^{-3} . Este valor indica um baixo grau de segurança das vigas danificadas em relação à ruptura, necessitando, deste modo, que se fizesse uma intervenção para sua recuperação estrutural.

O projeto de recuperação estrutural através do uso de PRFC, seguindo as recomendações da *fib* bulletin 14 [6], fez com que as resistências médias das vigas fossem recuperadas ou ficassem muito próximas das resistências médias das vigas originais. Sendo este o objetivo quando uma estrutura apresenta um estado avançado de degradação e se toma a decisão de uma intervenção para a sua recuperação estrutural.

Constatou-se, através dos estudos probabilísticos, que o coeficiente de variação das cargas de ruptura das vigas recuperadas, que é um parâmetro da variabilidade da resposta em torno de um valor médio, sofreu uma redução quando comparado ao coeficiente de variação das cargas de ruptura das vigas originais. Devido ao fato da proximidade das cargas médias de ruptura das vigas recuperadas e das vigas originais, e das reduções dos coeficientes de variação das cargas de ruptura das vigas recuperadas em relação às vigas originais, houve um aumento nos índices de confiabilidade das vigas originais para as vigas recuperadas, indicando uma menor probabilidade de falha das vigas recuperadas. Assim, o projeto de recuperação estrutural seguindo as recomendações da *fib* bulletin 14 [6] gerou bons níveis de segurança para as vigas analisadas, com confiabilidade das vigas recuperadas no mínimo igual à confiabilidade das vigas originais. Além disso, observou-se que na maioria dos casos as vigas recuperadas apresentaram confiabilidade maior, em relação à ruptura por flexão, que as vigas originais. Ademais, é importante destacar que na recuperação de estruturas de concreto armado situadas em ambientes marítimos, a utilização do PRFC é especialmente útil por causa da sua imunidade à corrosão.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo apoio recebido para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

1. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*. ACI Committee 440. Detroit, Jul. 2002.
2. ANG, A. H. S.; TANG, W. H. *Probability Concepts in Engineering Planning and Design. Volume I: Basic principles*. New York, John Wiley & Sons, 1984.
3. ANG, A. H. S.; TANG, W. H. *Probability Concepts in Engineering Planning and Design. Volume II: Decision, Risk, and Reliability*. New York, John Wiley & Sons, 1984.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento*. NBR 6118, Rio de Janeiro, Mar. 2003.
5. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. *Basis of Design and Actions on Structures - Part 1: Basis of Design*. CEN ENV 1991-1, 1994.
6. FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. *Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures*. bulletin 14, Lausanne, Switzerland, 2001.

7. GALAMBOS, T. V.; ELLINGWOOD, B.; MACGREGORr, J. G.; CORNELL, C. A. Probability Based Load Criteria: Assessment of Current Design Practice. *Journal of the Structural Division*, n. 108, p. 959-977, 1982.
8. INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO. *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. Volume 2, ed. G.C. Isaia, São Paulo, 2005.
9. JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. *Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials*. JSCE, Concrete engineering series 23, 1997.
10. PALIGA, C. M.; CAMPOS FILHO, A.; REAL, M. V. Finite Element Model for Numerical Analysis of Strengthened Reinforced Concrete Structures. *IBRACON Structural Journal*, n. 3-2, p.177-200, 2007.
11. PALIGA, C. M. *Análise probabilística de vigas de concreto armado recuperadas à flexão, através do método de Monte Carlo utilizando um modelo de elementos finitos*. Porto Alegre, 2008. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Engenharia Civil.