

CONFIABILIDADE DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO EM DIFERENTES SITUAÇÕES DE PROJETO

RELIABILITY OF REINFORCED CONCRETE BEAMS IN DIFFERENT PROJECT SITUATIONS

Rubens S. Correia^a, Giuliana F. F. Bono^a, Charlei M. Paliga^b e Gustavo Bono^a

^aLaboratório de Engenharia Computacional (LECOM), Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Rodovia BR 104, KM 59, s/n, Nova Caruaru, Caruaru-PE, Brasil, rubens.correia@ufpe.br, giuliana.franca@ufpe.br, gustavo.bono@ufpe.br, <https://www.ufpe.br/ppgecam>

^bDepartamento de Tecnologia da Construção, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Rua Benjamin Constant, 1359, Pelotas-RS, Brasil, charlei.paliga@ufpel.edu.br

Palavras-chave: vigas, concreto armado, confiabilidade estrutural, iHLRF.

Resumo. No projeto de vigas de concreto armado, existem incertezas relacionadas à resistência, solicitação e modelos de análise. Dessa forma, existe uma probabilidade de falha associada, relacionada aos estados-limites. Através de uma abordagem estocástica, onde as incertezas são consideradas de forma explícita no projeto, é possível avaliar a confiabilidade das vigas por meio do índice de confiabilidade. Assim, nesta pesquisa foi avaliada a confiabilidade de uma viga de concreto armado, projetada conforme a norma NBR 6118, em relação ao estado-limite último de flexão. Para tanto, foi utilizado o algoritmo iHLRF. Os índices de confiabilidade foram obtidos para diferentes valores de resistência do concreto e de relação entre as cargas. Os índices de confiabilidade obtidos foram maiores ou iguais ao valor mínimo de 3,8, estabelecido por códigos normativos. Porém, na situação de maior carga variável e menor resistência do concreto, o índice de confiabilidade ficou abaixo de 3,8. Foi verificado que o índice de confiabilidade diminui com o aumento da carga variável.

Keywords: beams, reinforced concrete, structural reliability, iHLRF.

Abstract. In the design of reinforced concrete beams, there are uncertainties related to strength, stress and analysis models. Thus, there is a probability of associated failure, related to the limit states. Through a stochastic approach, where uncertainties are explicitly considered in the project, it is possible to evaluate the reliability of the beams through the reliability index. Thus, this research evaluated the reliability of a reinforced concrete beam, designed according to the NBR 6118 code, in relation to the ultimate limit state of flexure. For this, the iHLRF algorithm was used. The reliability indexes were obtained for different values of concrete strength and the relationship between loads. The reliability indexes obtained were greater than or equal to the minimum value of 3.8, established by normative codes. However, in the situation of greater live load and less concrete strength, the reliability index was below 3.8. It was found that the reliability index decreases with the increase of the live load.

1 INTRODUÇÃO

O projeto de estruturas, assim como qualquer tipo de projeto em engenharia, envolve incertezas. Existem incertezas associadas aos modelos de análise, solicitações e propriedades dos materiais (Melchers e Beck, 2018). Portanto, existe uma probabilidade de falha. Para cobrir essas incertezas, o procedimento convencional tem sido obter uma resposta determinística da estrutura através de coeficientes parciais de segurança, que majoram ou minoram os parâmetros incertos. Atualmente, as principais normas técnicas de projeto utilizam o procedimento dos estados-limites, onde se aplicam esses coeficientes de segurança (Beck, 2019). Com essa abordagem, é provável obter uma estrutura superdimensionada ou subdimensionada frente às incertezas (Choi, Grandhi e Canfield, 2007).

A abordagem ideal para tratar as incertezas em projetos de engenharia é a abordagem estocástica. Nesse procedimento, as características estatísticas dos parâmetros incertos são levadas em consideração na análise da estrutura. A resposta da estrutura é obtida em termos estatísticos, resultando em um projeto robusto frente às incertezas (Choi, Grandhi e Canfield, 2007). Para quantificar a confiabilidade da estrutura, utiliza-se uma medida chamada de índice de confiabilidade, relacionada a probabilidade de falha, que pode ser utilizada na avaliação da confiabilidade.

No projeto de vigas de concreto armado existem incertezas na resistência do concreto (Beck, 2014), na resistência ao escoamento das barras de aço (Santiago, Kroetz e Beck, 2019), nas dimensões da seção transversal (Real, 2000), na carga permanente e variável (Beck, 2019) e nos modelos de resistência (Santos, 2012) e solicitação. Na avaliação da confiabilidade estrutural das vigas em relação ao estado-limite último de flexão, dado pela diferença entre o momento resistente e o solicitante, o índice de confiabilidade deve atender a um valor mínimo estabelecido por códigos normativos (FIB, 2013). Assim, a abordagem estocástica pode ser utilizada para realizar essa avaliação.

Existem diversas pesquisas sobre confiabilidade de vigas de concreto armado. Santos, Stucchi e Beck (2014) investigaram a confiabilidade de vigas projetadas conforme a norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014) para diferentes razões entre as cargas variáveis e permanentes e taxas de armadura, verificando que o índice de confiabilidade diminui à medida que a relação entre os carregamentos aumenta. Nogueira e Pinto (2016) avaliaram a uniformidade do índice de confiabilidade de vigas de concreto armado, também projetadas conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), para diferentes posições da linha neutra e relação entre as cargas, observando uma falta de uniformidade dos índices das vigas quando são dimensionadas com os mesmos coeficientes de segurança para diferentes situações de projeto, o que indica a necessidade de calibração desses coeficientes. Scherer (2018) avaliou a confiabilidade de vigas projetadas de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014) em diferentes situações, verificando uma grande influência da razão entre as cargas no índice de confiabilidade.

Assim, nesse contexto, nesta pesquisa foi avaliado o índice de confiabilidade de vigas de concreto armado, dimensionadas conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), para diferentes valores de razão entre a carga variável e total e resistência à compressão do concreto.

2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE CONFIABILIDADE

A viga de concreto armado considerada é apresentada na Figura 1. No modelo estrutural, tem-se uma viga biapoiada de vão (L) igual a 4 m, sujeita a um carregamento total uniformemente distribuído de 20 kN/m. A viga tem seção transversal retangular ($b \times h$) de 12x45 cm. O dimensionamento da viga foi realizado conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), considerando uma Classe de Agressividade Ambiental igual a II, diâmetro dos estribos igual a

5 mm e diâmetro das armaduras longitudinais igual a 12,5 mm. O dimensionamento foi realizado para a resistência à compressão do concreto (f_{ck}) igual a 25 MPa, 35 MPa e 45 MPa, com aço CA-50, resultando na mesma configuração: 4 barras de 12,5 mm e 2 porta-estribos de 5 mm. Para avaliar o índice de confiabilidade da viga em diferentes situações, foram variados os valores da razão entre carga variável e total ($r = \frac{q}{g+q}$) e do f_{ck} . A relação r foi variada de 0,2, 0,4, 0,6 e 0,8, e o f_{ck} de 25 MPa, 35 MPa e 45 MPa.

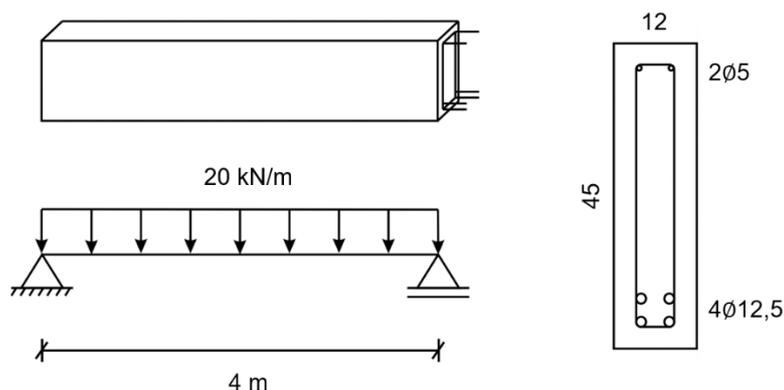


Figura 1: Viga de concreto armado considerada.

Na avaliação da confiabilidade da viga foram consideradas as seguintes variáveis aleatórias:

$$X = \{\theta_R, \theta_S, g, q, f_c, f_y\}^T \quad (1)$$

onde θ_R é o erro de modelo da resistência; θ_S é o erro de modelo da solicitação; g é a carga permanente; q é a carga variável; f_c é a resistência à compressão do concreto e f_y é a resistência ao escoamento do aço. As características estatísticas das variáveis aleatórias (distribuição de probabilidade, média e desvio-padrão) se encontram na [Tabela 1](#) e foram extraídas de [Scherer \(2018\)](#).

Variável	Distribuição	Média (μ)	Desvio-padrão (σ)
θ_R	Log-Normal	1	0,05
θ_S	Log-Normal	1	0,05
g	Normal	$1,05g$	$0,10\mu$
q	Gumbel	$\frac{q}{(1 + 0,35 \times 0,25)}$	$0,25\mu$
f_c	Normal	$\frac{f_{ck}}{(1 - 1,645 \times 0,10)}$	$0,10\mu$
f_y	Normal	$\frac{f_{yk}}{(1 - 1,645 \times 0,05)}$	$0,05\mu$

Tabela 1: Características estatísticas de X . Fonte: [Scherer \(2018\)](#).

O estado-limite último considerado é relativo à flexão, sendo calculado conforme a Eq. (2), pela diferença entre a resistência e a sollicitação. Na parcela da sollicitação, consideram-se os momentos fletores devido ao carregamento total ($g + q$) e ao peso próprio da viga ($\rho_c bh$), onde ρ_c é o peso específico do concreto armado igual a 25 kN/m³. Na Eq. (2), M é o momento resistente da seção.

$$g(X) = \theta_R M - \theta_S \left[\frac{(g + q)L^2}{8} + \frac{(\rho_c bh)L^2}{8} \right] \quad (2)$$

Assim, o problema de confiabilidade consiste em encontrar o índice de confiabilidade da viga de concreto armado, associado à probabilidade de falha quando a resistência é menor que a sollicitação ($g(X) < 0$) na flexão, frente às incertezas de X .

O momento resistente M é calculado conforme o procedimento apresentado em Araújo (2014), baseado no modelo da NBR 6118 (ABNT, 2014) para concretos com f_{ck} menor ou igual a 50 MPa. Nesse procedimento, são consideradas as características da Figura 2:

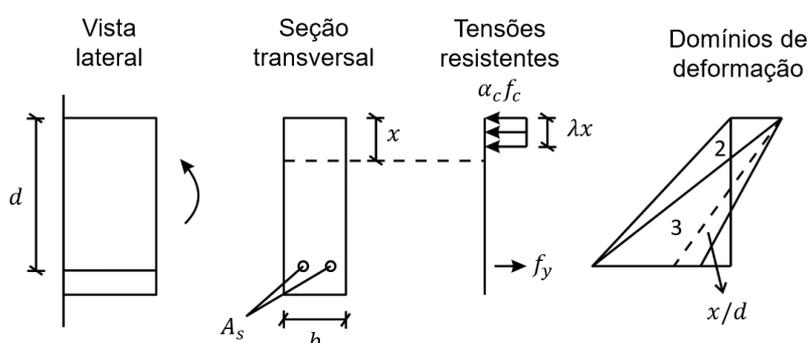


Figura 2: Seção transversal com armadura simples. Fonte: adaptado de Carvalho e Figueiredo Filho (2014).

Supondo que a viga está no domínio 2 ou 3 (aço tracionado com escoamento), a linha neutra (x) é dada pela Eq. (3). Se x for menor ou igual ao limite x_{34} entre os domínios 3 e 4 (Eq. (4)), a viga de fato está no domínio 2 ou 3. Caso contrário, a viga está no domínio 4 (aço sem escoamento), e a linha neutra é definida pela Eq. (5).

$$x = \frac{f_y A_s}{0,68 f_c b} \quad (3)$$

$$x_{34} = \left(\frac{3,5\%}{3,5\% + \varepsilon_y} \right) d \quad (4)$$

$$x = \frac{-3,5\% E_s A_s + \sqrt{3,5\% E_s A_s (3,5\% E_s A_s + 2,72 f_c b d)}}{1,36 f_c b} \quad (5)$$

onde f_y é a resistência ao escoamento do aço; A_s é a área de aço tracionado; f_c é a resistência à compressão do concreto; b é a largura da seção; ε_y é a deformação de escoamento do aço; d é a altura útil da seção; e E_s é o módulo de elasticidade do aço.

Com a linha neutra definida, o momento resistente M para a viga é:

$$M = 0,68 f_c x b (d - 0,4x) \quad (6)$$

O problema de confiabilidade formulado, apresentado anteriormente, foi implementado no

MATLAB (versão R2016a).

Para encontrar o índice de confiabilidade da viga, foi utilizado o algoritmo melhorado de Hasofer, Lind, Rackwitz e Fiessler, o iHLRF (Zhang e Der Kiureghian, 1995), que apresenta melhorias em relação ao HLRF original. Esse algoritmo foi selecionado pois o HLRF é um dos algoritmos mais utilizados em análises de confiabilidade estrutural (Beck, 2019). Além disso, métodos de primeira ordem (FORM) foram utilizados em outras pesquisas de confiabilidade de vigas de concreto armado (Santos, Stucchi e Beck, 2014; Nogueira e Pinto, 2016; Scherer, 2018). O iHLRF também foi implementado no MATLAB. Mais detalhes do procedimento de implementação e validação podem ser consultados em Correia (2020).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os índices de confiabilidade (β) para a viga com os diferentes valores de r e f_{ck} , determinados com o algoritmo iHLRF, se encontram na Tabela 2 e Figura 3.

r	β		
	25 MPa	35 MPa	45 MPa
0,2	6,19	6,42	6,55
0,4	4,96	5,13	5,23
0,6	4,18	4,32	4,40
0,8	3,66	3,79	3,86

Tabela 2: Índices de confiabilidade da viga.

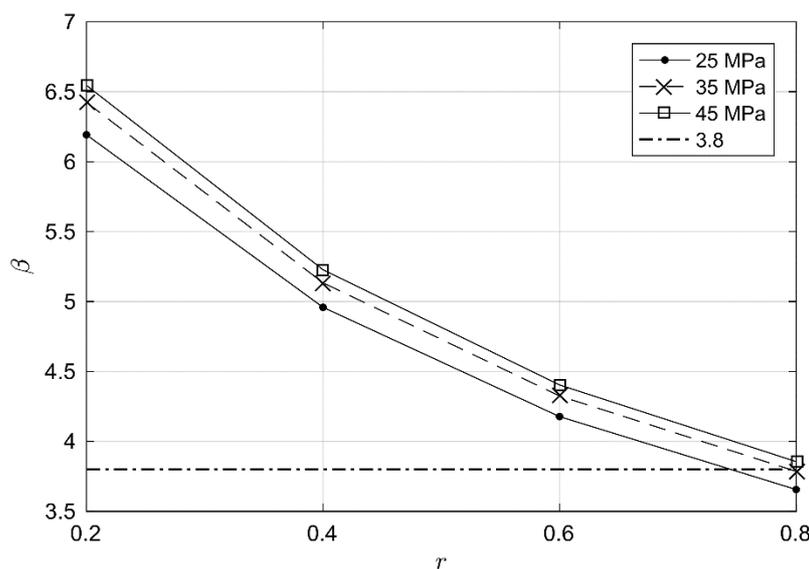


Figura 3: Índices de confiabilidade da viga.

Na Figura 3, o índice de confiabilidade igual a 3,8 representa um valor mínimo de confiabilidade estabelecido pelo código modelo *fib* 2010 (FIB, 2013) para estados-limites últimos, considerando um período representativo de 50 anos e falhas com consequências médias. Esse valor também foi utilizado nas avaliações de confiabilidade realizadas por Santos, Stucchi e Beck (2014), Nogueira e Pinto (2016) e Scherer (2018).

Como observado na Figura 3, a relação r tem grande influência no índice de confiabilidade da viga. A medida que a relação aumenta, o índice de confiabilidade diminui. Esse

comportamento também foi verificado por Santos, Stucchi e Beck (2014), Nogueira e Pinto (2016) e Scherer (2018). A diminuição do índice de confiabilidade com o aumento de r se justifica uma vez que, com valores elevados de $r = \frac{q}{g+q}$, a carga variável representa uma parcela significativa no carregamento total. Dentre as variáveis aleatórias consideradas (Eq. (1)), a carga variável apresenta grande variabilidade (Tabela 1). Assim, com valores consideráveis de carga variável, a probabilidade de falha aumenta e consequentemente o índice de confiabilidade diminui.

Na situação de $r = 0,8$ e $f_{ck} = 25$ MPa, o índice de confiabilidade foi menor que o valor mínimo de 3,8.

Em relação à variação do f_{ck} , conforme observado na Figura 3, existe um aumento no índice de confiabilidade com o aumento da resistência à compressão concreto. Porém, a influência do f_{ck} no índice de confiabilidade, quando comparada a da relação r , é menor. Com o aumento do f_{ck} , a capacidade resistente da viga aumenta (Eq. (6)). No entanto, esse comportamento pode ser diferente em função da situação e formulação analisada, onde o índice de confiabilidade pode diminuir com o aumento do f_{ck} (Scherer, 2018). Em outros tipos de dimensionamento, como no dimensionamento otimizado, esse comportamento também pode ser diferente (Correia, 2020).

A influência das variáveis aleatórias (Eq. (1)) no índice de confiabilidade pode ser avaliada através da análise dos coeficientes de sensibilidade (α^2). O valor de α^2 indica a contribuição relativa da variável aleatória na composição da probabilidade de falha. Quanto maior for α^2 , maior será a contribuição da variável na probabilidade de falha (Beck, 2019). Na Figura 4 são apresentados os *boxplot* dos coeficientes de sensibilidade para cada variável aleatória, em ordem decrescente com relação à média de α^2 . É observado que a carga variável q tem a maior contribuição na probabilidade de falha, em relação as demais variáveis, corroborando com a análise da Figura 3.

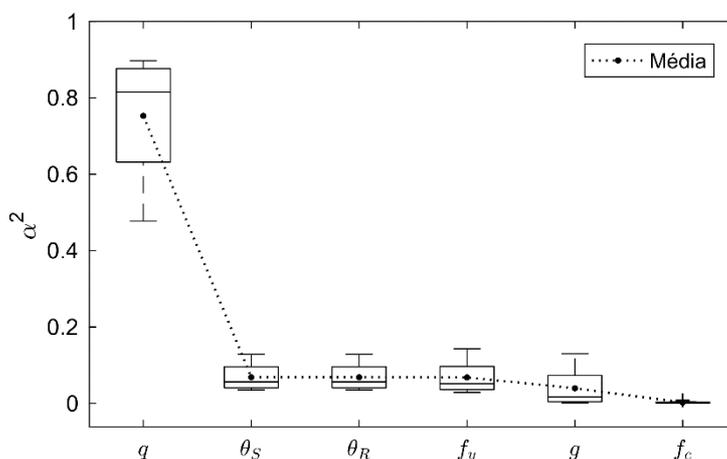


Figura 4: *Boxplot* para os coeficientes de sensibilidade.

4 CONCLUSÕES

Através da abordagem estocástica, foi possível avaliar e analisar a confiabilidade da viga de concreto armado utilizando o algoritmo iHLRF. No projeto da viga, existem incertezas associadas aos modelos de resistência e solicitação, e a variabilidade dos carregamentos e resistência dos materiais. Considerando o estado-limite último de flexão, existe uma probabilidade de falha da viga devido às incertezas, quando o momento solicitante é maior que o momento resistente da seção transversal.

Para as diferentes situações analisadas, variando a relação entre a carga variável e total e a resistência característica à compressão concreto, foi verificado que a relação entre os carregamentos tem grande influência no índice de confiabilidade. O aumento de carga variável reduziu o índice de confiabilidade, como observado também na análise dos coeficientes de sensibilidade das variáveis aleatórias. Esse comportamento também foi observado em outras pesquisas. O aumento da resistência à compressão do concreto aumentou o índice de confiabilidade, porém, essa mudança é menos significativa se comparada a variação da relação entre os carregamentos. Esse comportamento pode mudar, dependendo da situação analisada.

O índice de confiabilidade foi menor que o valor mínimo de 3,8, estabelecido por códigos normativos, quando a carga variável foi preponderante no carregamento ($r = 0,8$) com o menor f_{ck} (25 MPa). É importante observar que, nesse caso, não significa que necessariamente a viga não tem segurança em relação à flexão.

Por fim, ressalta-se que as conclusões obtidas são referentes às situações analisadas, considerando as formulações apresentadas. Outros resultados podem ser obtidos em situações diferentes.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas – Norma Brasileira. *Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, NBR 6118*. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- Araújo, J.M. *Curso de Concreto Armado*. v. 1, 4ª ed, Rio Grande: Dunas, 2014.
- Beck, A.T. Quantificação de incertezas em engenharia de estruturas. In: *VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas*, 2014, Rio de Janeiro.
- Beck, A.T. *Confiabilidade e Segurança das Estruturas*. 1ª ed, Rio de Janeiro: Elsevier, 2019.
- Carvalho, R.C.; Figueiredo Filho, J.R. *Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado*. 4ª ed, São Carlos: EdUFScar, 2014.
- Choi, S.K.; Grandhi, R.V.; Canfield, R.A. *Reliability-based structural design*. Berlin: Springer-Verlag, 2007.
- Correia, R.S. *Avaliação da confiabilidade de vigas otimizadas de concreto armado*. 2020. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – PPGECAM, Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2020.
- Fédération Internationale du Béton. *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Ernst & Son, 2013.
- Melchers, R.E.; Beck, A.T. *Structural reliability analysis and prediction*. 3ª ed, Hoboken: Wiley, 2018.
- Nogueira, C.G.; Pinto, M.D.T. Avaliação da variabilidade da segurança de vigas em concreto armado submetidas ao momento fletor considerando os coeficientes parciais de segurança da NBR 6118:2014. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 9, n. 5, p. 682-709, 2016.
- Real, M.V. *Análise probabilística de estruturas de concreto armado, sob estado plano de tensão, através do método dos elementos finitos*. 2000. 249 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – PPGE, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- Santiago, W.C.; Kroetz, H.M.; Beck, A.T. Calibração baseada em confiabilidade das normas brasileiras usadas em projetos de estruturas de concreto. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 12, n. 6, p. 1288-1304, 2019.
- Santos, E.S. *Avaliação estatística do erro de modelos de resistência para elementos lineares de concreto armado da ABNT NBR 6118:2007*. 2012. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, EESC, Universidade de São Paulo, 2012.
- Santos, D.M.; Stucchi, F.R.; Beck, A.T. Confiabilidade de vigas projetadas de acordo com as

- normas brasileiras. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 7, n. 5, p. 723-746, 2014.
- Scherer, M. *Avaliação da confiabilidade de vigas de concreto armado pelo método dos elementos finitos*. 2018. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
- Zhang, Y.; Der Kiureghian, A. Two improved algorithms for reliability analysis. In: *Proc. 6th IFIP WG7.5 conference on reliability and optimization of structural systems*, 1994, Assisi. Reliability and optimization of structural systems. Springer-Science+Business Media Dordrecht, 1995.