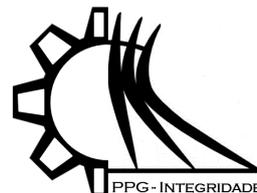




ISSN 2447-6102



Article

Confiabilidade de vigas de concreto armado em estruturas portuárias no estado limite último de flexão

Minasi, A.T.¹, Real, M.V.² and Paliga, C.M.^{3,*}

¹ Universidade Federal de Pelotas; andreminasi@hotmail.com

² Universidade Federal do Rio Grande; mvrealgm@gmail.com

³ Universidade Federal de Pelotas; charleipaliga@gmail.com

* Correspondence: charleipaliga@gmail.com; Tel.: +55-53-3284-5500

Received: 06/11/2020; Accepted: 05/12/2020; Published: 31/12/2020

Resumo: Este trabalho tem por objetivo estudar a confiabilidade estrutural nos projetos de vigas portuárias de concreto armado levando em consideração as prescrições da NBR 6118:2014. Foi considerado o desempenho de vigas sob carregamentos pesados em ambientes agressivos de zonas portuárias, verificando a influência da variação de parâmetros de projeto sobre a segurança da estrutura. A verificação da confiabilidade estrutural dos projetos se deu através da avaliação do índice de confiabilidade segundo o Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM – *First Order Reliability Method*), o qual foi aplicado para a verificação do estado limite-último de flexão para as vigas dimensionadas e com redução na área efetiva de aço da armadura de tração devido à corrosão. Foram realizados estudos paramétricos para avaliar a confiabilidade das vigas de acordo com a variação da resistência característica à compressão do concreto, carregamento permanente, carregamento variável e taxa de armadura tracionada. Os resultados se mostraram coerentes, tendo o índice de confiabilidade apresentado grande variação para relações de carregamento variável elevada e redução da taxa de armadura tracionada, concluindo com a necessidade de revisar os coeficientes de segurança propostos pela norma Brasileira para cargas variáveis.

Palavras-chave: estruturas portuárias; vigas de concreto armado; confiabilidade estrutural; FORM

Reliability of reinforced concrete beams in port structures in the bending ultimate limit state

Abstract: This work aims to study the structural reliability of reinforced concrete port beams design, taking into account the requirements of NBR 6118:2014. The performance of beams under heavy loads in aggressive environments in port areas was considered, verifying the influence of design parameters' variation on the structure's safety. The structural reliability verification was made by evaluating the reliability index using the First Order Reliability Method (FORM). The method FORM was applied to verify the ultimate limit state of bending for the beams designed and with a reduced effective steel area of the tensile reinforcement due to corrosion. Parametric studies were carried out to evaluate the beams' reliability according to the variation of the characteristic compressive strength of concrete, dead load, live load, and tensioned reinforcement rate of corrosion. The results were shown to be coherent, with the reliability index showing a significant decrease for high live loading ratios and major reductions of the tensioned reinforcement cross-sectional area, concluding with the need to review the safety coefficients proposed by the Brazilian standard for live loads.

Keywords: port structures; reinforced concrete beams; structural reliability; FORM



1. Introdução

Os portos apresentam uma grande importância estratégica para um país, e o desenvolvimento de uma região está diretamente ligado ao desempenho de um porto, uma vez que servem de interface entre o transporte terrestre e aquático, atraindo, assim, um grande número de investimentos. Como porta de entrada e saída de pessoas e mercadorias, os portos necessitam disponibilizar uma estrutura capaz de absorver a demanda do mercado, de modo que suas atividades garantam eficiência nos processos de carga e descarga de mercadorias, mas também possibilitem o armazenamento destas pelo período que for necessário.

Em portos cuja atividade principal é o transporte de cargas, geralmente há instalado em sua área retro portuária uma grande quantidade de fábricas dos mais variados segmentos. Assim, é fundamental a existência de estruturas portuárias capazes de garantir a eficiência e eficácia dos processos logísticos envolvidos. Por serem estruturas de grande porte e que recebem carregamentos elevados, essas estruturas são geralmente construídas em concreto armado ou concreto protendido, devido ao seu custo reduzido tanto de construção como de manutenção.

A exposição a diversos fatores climáticos, um ambiente quimicamente agressivo e a ação de grandes carregamentos, demanda que as estruturas portuárias tenham, além de um projeto bem elaborado, um rigoroso controle em sua execução. É fato que o custo de uma estrutura está diretamente ligado ao seu custo de execução, o que conseqüentemente está ligado ao seu desempenho. Assim, é possível dizer que o custo de execução de uma estrutura com 99% de segurança é mais elevado que uma estrutura com 95%, devendo ser verificada essa relação entre segurança e custo. A Figura 1 apresenta uma situação típica de um cais portuário, onde há a incidência de diferentes carregamentos.



Figura 1. Diferentes carregamentos em um cais portuário (Fonte: 123RF, 2015).

O concreto armado, apesar de amplamente conhecido e estudado, apresenta em sua composição materiais que podem conferir diferentes propriedades à estrutura, sejam elas pelo tipo de matéria prima utilizada, por especificações de projeto ou pelo processo executivo empregado. Conforme Medeiros e Helene (2009), o concreto sempre foi visto como um material extremamente durável, e que não havia preocupação com o seu desempenho em termos de vida útil.

Segundo Bolina et al. (2019), a preocupação com os princípios de durabilidade começou a constituir os estudos vinculados a ciência dos materiais aplicados na construção civil. Embora tardiamente, notou-se que aquela crença de que as construções eram “para sempre” se dissolvia e uma restrição ao uso indiscriminado dos materiais para toda e qualquer circunstância começava a ganhar força. Passou-se a se preocupar não apenas em construir uma estrutura utilizável, mas também em garantir que ela fosse um produto durável no tempo.

No Brasil, as primeiras preocupações com esse quesito, em termos normativos, aconteceram em 2003, com a revisão da NBR 6118. Naquela oportunidade, definiram-se as classes de agressividade ambiental (CAA), separando o meio circundante das estruturas em quatro categorias, hierarquizadas segundo o potencial de agressão às estruturas de concreto armado. A NBR 6118 ainda foi revisada em 2007 e em 2014 e, em ambas as oportunidades, continuou sem quantificar a vida útil de projeto para as edificações, sendo que essa lacuna foi preenchida em 2013, quando entrou em vigor a tão debatida e questionada norma de desempenho (Bolina et al., 2019).

Pereira e Helene (2007) destacam que o conceito de vida útil está atrelado ao sistema estrutural da construção, e que findada a vida útil do sistema estrutural, é igualmente findada a vida útil da construção. Devido a esta importância, os estudos relacionados às manifestações patológicas das estruturas de concreto armado é um assunto em evidência nos dias atuais. Assim, segundo Zhao et al. (2017), na engenharia, o problema da corrosão das barras de aço tem afetado cada vez mais o uso das estruturas de concreto armado, podendo ser classificado com um dos principais e mais importantes problemas patológicos. Os efeitos da corrosão na armadura de uma viga de paramento de um cais são apresentados na Figura 2, onde ocorreu o destacamento do concreto e redução da área da seção transversal da armadura.

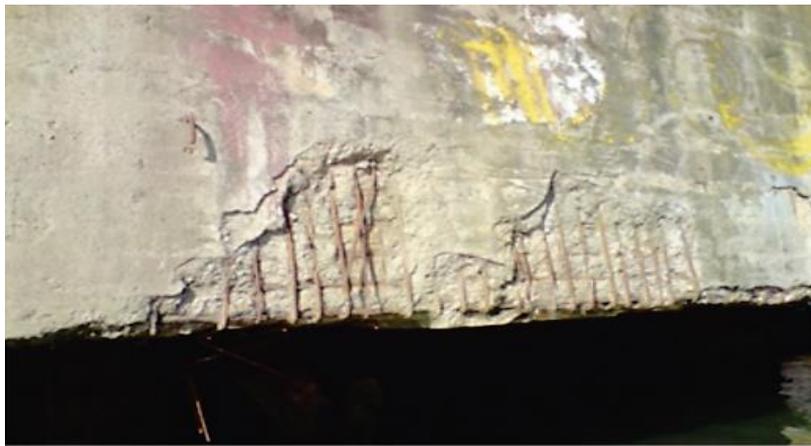


Figura 2. Corrosão da armadura de uma viga de paramento (Fonte: Alencar, 2010).

Como as estruturas de concreto armado estão sujeitas a diferentes solicitações ao longo de sua vida útil e, por se tratarem de sistemas com certas probabilidades de falha, deve-se quantificar essas incertezas para que seja possível estipular o seu grau de segurança. Para Veiga (2008), a análise de confiabilidade relaciona as várias incertezas que envolvem um projeto de engenharia, as quais surgem de uma aleatoriedade dos parâmetros que envolvem o problema, como a escolha do modelo estrutural, os parâmetros físicos, variações decorrentes da ação do homem, etc.

A partir do ano 2000, houve uma série de publicações que trouxeram contribuições relevantes para o estudo da confiabilidade de estruturas de concreto, de forma que a aplicação dos conceitos da Teoria da Confiabilidade na determinação do nível de segurança alcançado no projeto de estruturas de concreto vem crescendo no Brasil. Dentre as quais, podem ser citados os trabalhos de Real (2000), que apresentou um modelo para análise probabilística de estruturas de concreto armado, sob o estado plano de tensões, através do método dos elementos finitos; Nowak e Szerszen (2003), que apresentaram a calibração da norma americana de projeto de estruturas de concreto ACI-318; Paliga et al. (2008), que testaram a confiabilidade de vigas de concreto armado deterioradas pela agressividade do ambiente marítimo e recuperadas com polímeros de fibra de carbono; Rocha (2014) que utilizou o Método FORM para avaliar projetos de vigas portuárias em concreto protendido de acordo com as especificações da NBR 6118 (ABNT, 2014) e Correia (2020), onde o autor faz a avaliação da confiabilidade de vigas de concreto armado otimizadas através do Método dos Algoritmos Genéticos.

Sendo assim, o presente trabalho se justifica pela relação entre o valor agregado que as estruturas portuárias apresentam para todo o setor produtivo nacional, e as incertezas associadas ao projeto de estruturas de concreto armado segundo o método proposto pelas normas brasileiras. Portanto, este trabalho teve por objetivo estudar a confiabilidade estrutural no projeto de vigas portuárias de concreto armado, levando em consideração as prescrições da NBR 6118 (ABNT, 2014). Foi considerado o desempenho de vigas sob a atuação de carregamentos pesados no ambiente agressivo de zonas portuárias. A verificação da confiabilidade estrutural dos projetos se deu através da avaliação do índice de confiabilidade β , determinado segundo o Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM – *First Order Reliability Method*), o qual foi aplicado para a verificação do estado limite último de flexão para vigas com e sem redução na área efetiva de aço da armadura de tração por corrosão. Foram consideradas como variáveis aleatórias nas análises de confiabilidade a resistência à compressão do concreto, a resistência ao escoamento do aço e as parcelas permanente e variável do carregamento.

Ademais, foi feita uma análise paramétrica variando-se a resistência à compressão do concreto, a relação entre a carga permanente e a carga total e também três níveis de danos causados por corrosão das armaduras longitudinais tracionadas.

2. Confiabilidade estrutural

Segundo Beck (2019), confiabilidade de um sistema é a probabilidade de que este sistema não falhe, dentro de uma vida de projeto especificada, respeitadas as condições de operação e de projeto do mesmo.

A elaboração de um projeto estrutural tem como prerrogativa considerar as prescrições apresentadas por normas técnicas, as quais estabelecem regras, diretrizes ou características, geralmente baseadas em ensaios de laboratório, experiências anteriores, estatísticas, etc. No entanto, há variáveis envolvidas em um projeto que apresentam incertezas que necessitam ser contabilizadas na forma de probabilidades, buscando evitar a ocorrência de falhas do sistema estrutural.

Apesar de as variáveis relacionadas às ações e capacidades resistentes das estruturas serem consideradas variáveis determinísticas nos métodos de projeto frequentemente adotados, essas na realidade são variáveis aleatórias, as quais não apresentam uma segurança absoluta sobre a estrutura e conseqüentemente apresentam uma probabilidade finita de falha. Assim, a confiabilidade estrutural está relacionada a essas variáveis aleatórias e a probabilidade da ocorrência de situações diferentes daquelas para as quais a estrutura foi projetada.

Ang e Tang (1990) explicam o problema básico de confiabilidade como o modo de garantir que a capacidade seja superior à demanda ao longo da vida útil dos sistemas. Em problemas de engenharia, a resistência R pode ser associada a capacidade portante da estrutura, enquanto S representa as ações dos carregamentos. Assim, em termos de probabilidade, tem-se que $P(R \geq S)$ é a probabilidade de que a resistência seja maior que a solicitação, sendo este um indicativo de confiabilidade do sistema estrutural. Por outro lado, o evento complementar $P(R < S)$ é chamado de probabilidade de falha, onde a resistência R não apresenta os requisitos mínimos para superar as solicitações S impostas na estrutura.

Paliga (2008) mostra que o problema de confiabilidade estrutural pode ser abordado, também, através da chamada função de estado limite ou margem de segurança M , onde é possível representar a margem de segurança através de uma distribuição de probabilidade, sendo a falha quando $M < 0$, onde M é dada por:

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

Por existirem diferentes métodos de confiabilidade estrutural, os mesmos podem ser classificados em Métodos de nível 0, que utilizam o formato onde todas as cargas são tratadas similarmente e as tensões elásticas são reduzidas por meio de um fator de segurança; Métodos de nível I, que empregam um valor característico para cada valor dito "incerto" (o Método dos Estados Limites é um exemplo); os Métodos de nível II, que empregam dois valores característicos para cada valor "incerto" (usualmente média e variância) e uma medida que correlacione os parâmetros, e por fim, os Métodos de nível III, que empregam a probabilidade de ocorrência de falha da estrutura como medida de confiabilidade da mesma. Para estes métodos, as funções de densidade de probabilidade das variáveis básicas se fazem necessárias, podendo o Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM) ser utilizado para tal.

Segundo bibliografias clássicas que tratam do tema da confiabilidade estrutural, como Ang e Tang (1990), Melchers (1999) e Beck (2019), o princípio básico do método FORM consiste em transformar as variáveis aleatórias de um grupo $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ com distribuições quaisquer de probabilidade, correlacionadas ou não entre si, em um grupo $X' = (X'_1, X'_2, \dots, X'_n)$ de variáveis aleatórias estatisticamente independentes, normais equivalentes padronizadas (média μ zero e desvio padrão s unitário). Além disso, é necessário definir uma função de estado limite:

$$g(X) = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (2)$$

Nesta equação de estado limite, $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ é um vetor de variáveis básicas de projeto (resistência à compressão do concreto, tensão de escoamento do aço, altura útil da seção, carga variável, carga permanente, erro no modelo de resistência, erro no modelo das solicitações, etc.), e $g(X)$ determina o desempenho do sistema, tal como apresentado na equação (1). Ang e Tang (1990) definem o desempenho como $g(X) = 0$, também chamado de superfície de falha, caracterizado pelo estado limite do sistema. Assim, $g(X) > 0$ apresenta o domínio de segurança e

$g(X) < 0$ o domínio de falha, onde, como mostrado na equação (1), a solicitação imposta à estrutura é maior que a sua resistência.

De modo a conceituar o índice de confiabilidade β , que é uma medida da segurança do sistema, que quanto maior o seu valor menor a probabilidade de falha, toma-se por base um conjunto de variáveis não correlacionadas em sua forma reduzida, isto é, um conjunto de variáveis que apresente média zero e desvio padrão unitário. Na Figura 3 é sintetizado o processo do método FORM para um caso bidimensional, enquanto que na equação (3) é apresentada a transformação para o espaço normal padrão. A formulação apresentada para o Método FORM é a mesma que consta em Ang e Tang (1990).

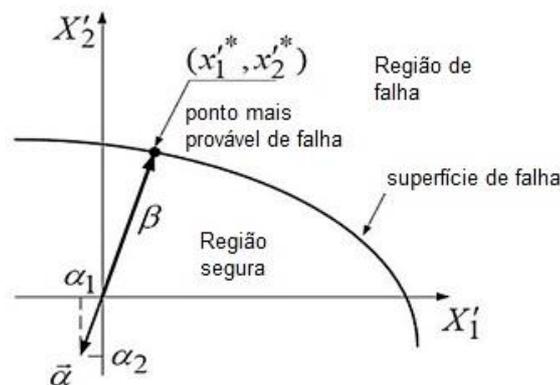


Figura 3. Índice de Confiabilidade β e cossenos diretores, representação geométrica (Fonte: Rocha, 2014).

$$X'_i = \frac{X_i - \mu_{X_i}}{\sigma_{X_i}}; \quad i=1,2, \dots, n \tag{3}$$

Para estas variáveis reduzidas, a função de estado limite é definida como:

$$g(\sigma_{X_1}X'_1 + \mu_{X_1}, \dots, \sigma_{X_n}X'_n + \mu_{X_n}) = 0 \tag{4}$$

O ponto na superfície de falha que compõe o menor segmento de reta até a origem das variáveis é o ponto mais provável de ocorrência de falha, também chamado de ponto de projeto, o qual está relacionado ao índice de confiabilidade β .

A distância de um ponto $X' = (X'_1, X'_2, \dots, X'_n)$ até a origem no espaço das variáveis reduzidas pode ser dada por:

$$D = \sqrt{X'^2_1 + \dots + X'^2_n} = (X'^T X')^{\frac{1}{2}} \tag{5}$$

Para obter o ponto na superfície de falha, que apresente a menor distância até a origem, efetua-se a minimização da função D, obedecendo a condição $g(X) = 0$. Com o uso dos multiplicadores de Lagrange (λ), obtém-se:

$$L = D + \lambda g(X) = (X'^T X')^{\frac{1}{2}} + \lambda g(X) \tag{6}$$

A equação (6) em notação escalar fica:

$$L = \sqrt{X'^2_1 + X'^2_2 + \dots + X'^2_n} + \lambda g(X_1, X_2, \dots, X_n) \tag{7}$$

sendo $X_i = \sigma_{X_i}X'_i + \mu_{X_i}$.

Derivando a equação (7) em relação à X'_i e ao menor multiplicador de Lagrange λ , encontra-se um sistema de $n + 1$ equações com $n + 1$ incógnitas.

$$\frac{\partial L}{\partial X_i} = \frac{1}{\sqrt{X_1'^2 + X_2'^2 + \dots + X_n'^2}} + \lambda \frac{\partial g}{\partial X_i} = 0; \quad i=1,2, \dots, n \quad (8)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = g(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0 \quad (9)$$

Como solução para o sistema das equações (8) e (9) encontra-se o ponto mais provável de falha, sobre a superfície de falha e que apresenta a menor distância até a origem. Introduzindo-se agora o vetor gradiente tem-se:

$$G = \left(\frac{\partial g}{\partial X_1}, \frac{\partial g}{\partial X_2}, \dots, \frac{\partial g}{\partial X_n} \right) \quad (10)$$

onde:

$$\frac{\partial g}{\partial X_i} = \frac{\partial g}{\partial X_i} \frac{\partial X_i}{\partial X_i} = \sigma_{xi} \frac{\partial g}{\partial X_i} \quad (11)$$

Substituindo a equação (5) na equação (8), e escrevendo a mesma em notação matricial, tem-se:

$$X' = -\lambda DG \quad (12)$$

Substituindo a equação (12) na equação (5), tem-se que $\lambda = (G^T G)^{1/2}$, podendo ser reescrita a equação (12) conforme a equação (13).

$$X' = -\frac{DG}{(G^T G)^{1/2}} \quad (13)$$

Realizando a pré-multiplicação da equação (13) por G^T , tem-se:

$$D = \frac{-G^T X'}{(G^T G)^{1/2}} \quad (14)$$

Substituindo a equação (13) na equação (8), chega-se a uma única equação com incógnita D, onde a solução da mesma é a distância mínima $D_{\min} = \beta$, logo:

$$\beta = \frac{-G^{*T} X'^*}{(G^{*T} G^*)^{1/2}} \quad (15)$$

onde G^* é o vetor gradiente no ponto mais provável de ocorrência de falha. Assim, este ponto é dado por:

$$X'^* = \frac{-G^* \beta}{(G^{*T} G^*)^{1/2}} \quad (16)$$

Em sua forma escalar, os componentes de X'^* são:

$$x_i'^* = -\alpha_i^* \beta; \quad i=1, 2, \dots, n \quad (17)$$

onde:

$$\alpha_i^* = \frac{\left(\frac{\partial g}{\partial X_i}\right)^*}{\sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial g}{\partial X_i}\right)^2}} \quad (18)$$

α_i^* , são os cossenos diretores, conforme se pode observar na Figura 3.

A adoção do índice de confiabilidade como elemento de avaliação do grau de segurança frente às diferentes incertezas envolvidas no projeto é convenientemente prático, no entanto, se faz necessário estipular valores de referência com os quais possa-se comparar os índices obtidos. O índice de confiabilidade de referência é também conhecido como índice de confiabilidade alvo (β_{alvo}).

Santos et al. (2014), em seu estudo sobre a confiabilidade para vigas de concreto armado dimensionadas utilizando os coeficientes de segurança da norma brasileira, identificaram que o índice de confiabilidade β variou de valores na ordem de 4,25 até um mínimo de 2,7, de acordo com a variação da carga variável sobre a carga permanente. Para Santos et al. (2014), os valores para a norma brasileira se mantêm ligeiramente menores que o valor assumido pela norma americana ACI que é de 3,5, e também do limite estabelecido pelo EuroCode que é de 3,8.

3. Cálculo da capacidade resistente no estado limite último de flexão

A verificação da capacidade resistente da seção de uma viga de concreto armado tem como objetivo encontrar o seu momento de ruptura sob determinadas condições de carregamento, estando apresentado na equação (1) como R. Para isso devem ser conhecidas as dimensões da seção, propriedades dos materiais utilizados e adotadas algumas hipóteses fundamentais, que segundo Clímaco (2008) são:

- As seções transversais permanecem planas após a deformação de flexão até a ruptura;
- A deformação da armadura, em tração ou compressão, é a mesma do concreto em seu entorno, sendo assim, é considerada aderência perfeita entre aço e concreto;
- As tensões de tração no concreto, normais à seção transversal, são desprezadas no estado limite último;
- As tensões para o concreto comprimido são obtidas através do diagrama tensão-deformação idealizado, conforme recomendado pela NBR 6118 (ABNT, 2014), e a tensão nas armaduras a partir do diagrama tensão-deformação simplificado para aço, com comportamento elástico-perfeitamente plástico e deformação máxima de 10‰.
- Como simplificação, permite-se utilizar o diagrama retangular simplificado de tensões, com altura $y=0,8x$ para concretos de classe até C50, sendo x a profundidade da linha neutra.

Para vigas sob flexão simples, é coerente apenas o dimensionamento dentro dos domínios 2, 3 e 4, visto que para os domínios 1 e 5 a seção não consegue estabelecer uma compensação de esforços internos, consequentemente não forma o binário para equilibrar o momento externo.

A distribuição de tensões e deformações pode ser verificada através do exposto na Figura 4, onde é possível realizar o equilíbrio de forças e de momentos.

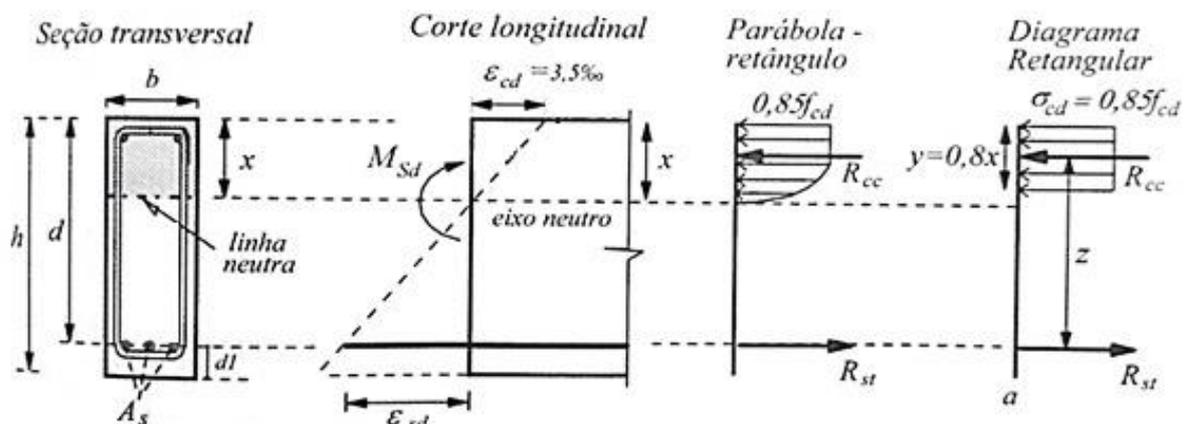


Figura 4. Diagramas de tensões para seção retangular na ruptura por flexão (Fonte: Clímaco, 2008).

O equilíbrio de forças é dado por $\Sigma F = 0$, onde:

$$R_{cc} - R_{st} = 0 \quad (19)$$

$$0,8x_b\sigma_{cd} - \sum_{i=1}^n A_{si}\sigma_{si} = 0 \quad (20)$$

O equilíbrio de momentos é dado por $\Sigma M = 0$, onde:

$$M_{Rd} = \sum_{i=1}^n A_{si}\sigma_{si} (d - 0,4x) \quad (21)$$

A equação (20) é utilizada para a obtenção da profundidade da linha neutra x , enquanto que a equação (21) fornece o momento resistente. No entanto, por não se saber qual o domínio de deformação em que ocorre a ruptura, não é possível obter x diretamente. Para se determinar a posição da linha neutra (x) é possível utilizar um processo numérico através do Método da Bissecante, o qual permite satisfazer as equações propostas.

A equação (20) pode ser escrita de maneira genérica, na forma $f(x)=0$, onde:

$$f(x) = R_{cc}(x) + \sum_{i=1}^n A_{si}\sigma_{si}(x) \quad (22)$$

A raiz da equação (22) deve estar contida no intervalo $[0, d]$, o qual engloba os domínios da flexão. Os limites do intervalo onde se encontra a raiz são $x_0=0$ e $x_u=d$, assim a função $f(x)$ nos extremos vale $f(x_0)=f_0$ e $f(x_u)=f_u$.

A primeira aproximação de x_1 para a raiz da função é tomada como a intersecção da reta que passa pelos extremos e o eixo das abscissas.

$$x_1 = \frac{x_0 f_u - x_u f_0}{f_u - f_0} \quad (23)$$

Em seguida é calculado $f_1=f(x_1)$ e testada a convergência. Para que a convergência seja satisfeita e se encontre a solução do problema, o valor absoluto da raiz aproximada deve ser menor que uma tolerância pré-estabelecida, a qual pode ser tão pequena quanto se deseja. No caso em que a convergência não seja alcançada, deve-se reduzir o intervalo de avaliação. Para tanto, é testado se o produto $f_1 f_0$ é maior que zero e caso seja verdadeiro, o novo intervalo de avaliação é $[x_1, x_u]$, caso contrário $[x_0, x_1]$. Com o novo intervalo é calculado o novo valor da raiz a ser testada através da equação (20) e assim sucessivamente até a convergência. O valor determinado para a raiz é aplicado na equação (21), determinando assim o momento resistente da seção.

O modelo de resistência utilizado neste trabalho pode ser melhor observado em Moura et al. (2018), onde os autores fazem uma validação do mesmo através da comparação com resultados de 41 ensaios experimentais encontrados na bibliografia internacional, sendo obtida uma diferença da ordem de 5%. A única diferença do modelo de resistência utilizado neste trabalho, com o modelo dos autores acima citados, é que a deformação inicial na armadura foi tomada como sendo nula por serem estudadas aqui vigas de concreto armado.

4. Apresentação do problema abordado

A avaliação da confiabilidade das vigas de concreto armado no estado limite último de flexão se deu através da análise de vigas biapoimadas, sendo todas de mesma seção retangular (40x100 cm) e mesmo vão de cálculo ($l = 10$ m).

Para o dimensionamento se adotou três diferentes resistências características à compressão do concreto (40 MPa, 45 MPa e 50 MPa), bem como um carregamento total (p_k) na ordem de 100 kN/m, onde g representa a parcela de carga permanente e q a parcela da carga variável. A Figura 5a demonstra a seção transversal típica da viga para um primeiro dimensionamento, onde se considerou um cobrimento para CAA-IV (5,0 cm), armadura transversal com estribos de 8 mm e utilização de barras longitudinais de 25 mm de diâmetro. As vigas foram dimensionadas à flexão conforme as prescrições da NBR 6118 (ABNT, 2014), com resultados apresentados na Tabela 1, sendo que na Figura 5b é apresentada a seção transversal com a disposição das barras de aço após o dimensionamento.

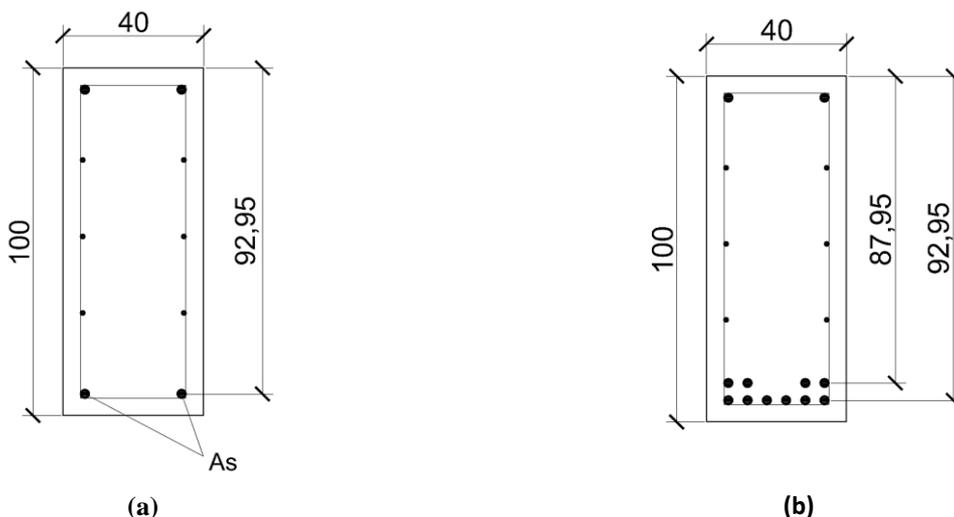


Figura 5. Seção transversal típica de dimensionamento (Medidas em cm).

Tabela 1. Valores referentes ao dimensionamento das vigas no ELU.

f_{ck} (MPa)	M_k (kN.m)	A_s (cm ²)	Armação adotada	A_{se} (cm ²)
40	1250,00	49,11	10 Ø 25,0 mm	49,09
45	1250,00	48,29	10 Ø 25,0 mm	49,09
50	1250,00	47,68	10 Ø 25,0 mm	49,09

Visando comparar a confiabilidade das vigas de concreto armado sob diferentes condições de resistência e de solicitações, foram analisadas 36 situações de projeto e verificado o quanto a variação de cada parâmetro envolvido no dimensionamento afeta o índice de confiabilidade β das vigas. Foram realizadas variações em três parâmetros referentes à resistência, solicitações e taxa de armadura de tração. As variações se deram da seguinte maneira:

- Resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}): foram adotados valores de 40 MPa, 45 MPa e 50 MPa;
- Relação entre carga permanente e a carga total (r): o carregamento permanente g_k é definido pela soma das cargas g_1 e g_2 , que representam respectivamente o peso próprio da viga e a sobrecarga permanente. A carga total p_k representa a soma do carregamento permanente g_k e do carregamento variável q_k , assim a relação r é expressa por:

$$r = \frac{g_k}{p_k} = \frac{g_k}{g_k + q_k} = \frac{g_k}{(g_1 + g_2) + q_k} \tag{24}$$

Assim, foram feitas variações no valor de r , tendo este variado em 0,25, 0,50 e 0,75, conseqüentemente variando a proporção entre o carregamento permanente e variável.

- Dano por corrosão na armadura de tração: para analisar a confiabilidade de vigas de concreto diante da redução na área efetiva de aço da armadura de tração, simulando a perda de resistência por corrosão, foram aplicados fatores de redução na ordem de 10%, 20% e 30% da área inicialmente projetada. Além das reduções aplicadas, é apresentada também a confiabilidade para vigas sem dano, isto é, dano com percentual de 0%.

As variáveis aleatórias consideradas no projeto e seus respectivos parâmetros para utilização do método de avaliação da confiabilidade são apresentados na Tabela 2, sendo elas a resistência à compressão do concreto, a resistência ao escoamento do aço, a carga permanente e a carga variável. Os tipos de distribuição das variáveis e os respectivos coeficientes de variação foram definidos segundo o apresentado por Galambos (1982).

Conforme visto no item 2, equação (1), a diferença entre a resistência e a sollicitação é denominada função de estado limite, sendo caracterizada neste trabalho pela diferença entre o momento resistente (M_R) da seção transversal mais sollicitada e o somatório dos momentos provenientes das cargas permanentes ($M_{S,g}$) e das cargas variáveis ($M_{S,q}$), resultando na seguinte função de estado limite:

$$g(X) = M_R - M_{S,g} - M_{S,q} \quad (25)$$

Os modelos para determinação dos momentos solicitantes são em função da carga distribuída linearmente ao longo do vão da viga (l), e o momento resistente da seção (M_R) é determinado através do procedimento apresentado no item 3 deste trabalho, assim:

$$g(X) = M_R - \frac{gl^2}{8} - \frac{ql^2}{8} \quad (26)$$

Tabela 2. Variáveis aleatórias.

VARIÁVEL	μ_X	$V_X = \sigma_X / \mu_X$	DISTRIBUIÇÃO
f_c	$\frac{f_{ck}}{(1-1,65V_X)}$	0,15	Normal
f_y	$\frac{f_{yk}}{(1-1,65V_X)}$	0,10	Lognormal
g	g_{nom}	0,10	Normal
q	q_{nom}	0,25	Gumbel

O índice de confiabilidade das vigas foi determinado com a utilização de uma ferramenta que permite a solução de problemas de minimização. Para o procedimento adotado neste trabalho, foi utilizada a ferramenta Solver, integrada ao software Excel. Essa ferramenta recebe como dados de entrada as condições de restrição do problema na função de desempenho e determina a menor distância (β) entre a origem do sistema de variáveis transformadas e a superfície de falha, sendo a restrição imposta a própria função de estado limite $g(X)=0$.

5. Resultados

Feito o dimensionamento das vigas conforme as recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2014), e detalhada no item 4, passa-se para a etapa da análise de confiabilidade com a utilização dos procedimentos apresentados anteriormente, sendo este aplicado às 36 combinações de parâmetros.

5.1. Influência da resistência característica à compressão do concreto:

Pela variação isolada da resistência característica à compressão do concreto f_{ck} é verificado o comportamento do índice de confiabilidade β para as três diferentes relações de carregamento r . Em cada verificação foram plotadas curvas para as quatro situações de dano na armadura de tração, conforme apresentadas nas Figuras 6, 7 e 8.

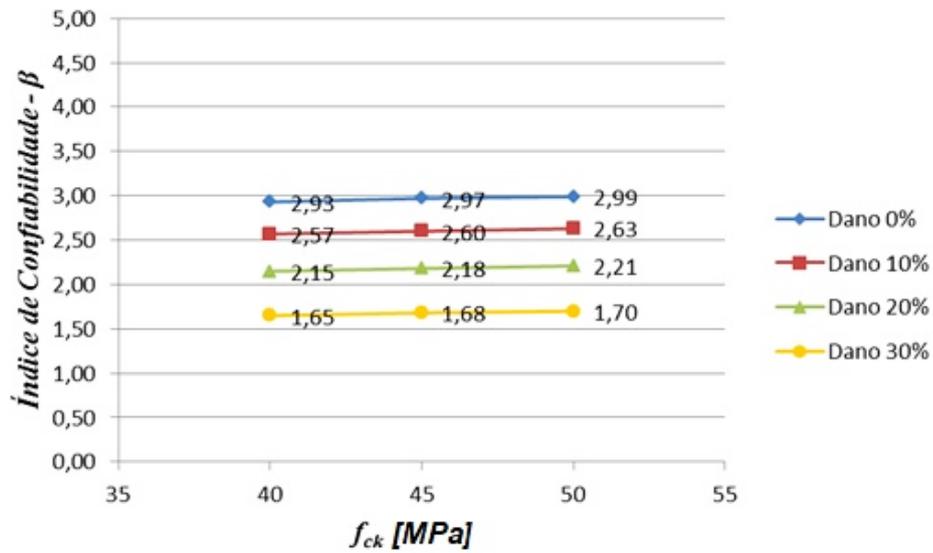


Figura 6. Variação de $\beta \times f_{ck}$ ($r = 0,25$).

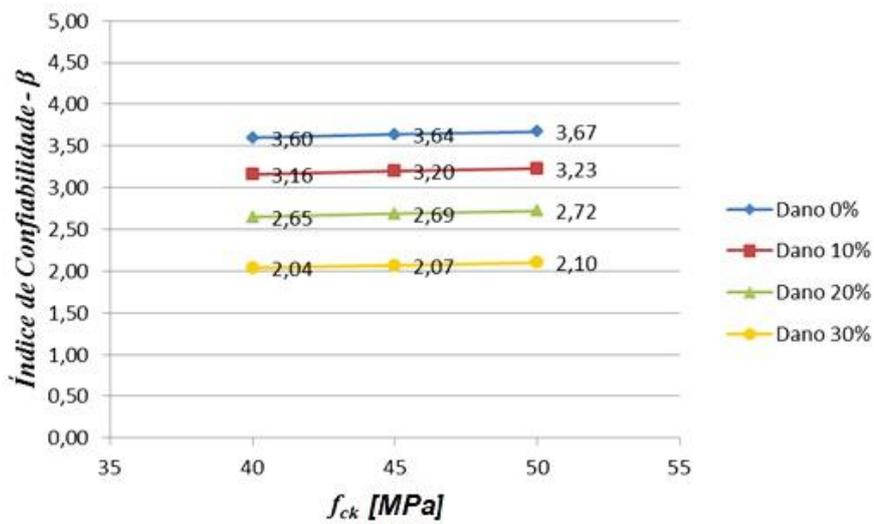


Figura 7. Variação de $\beta \times f_{ck}$ ($r = 0,50$).

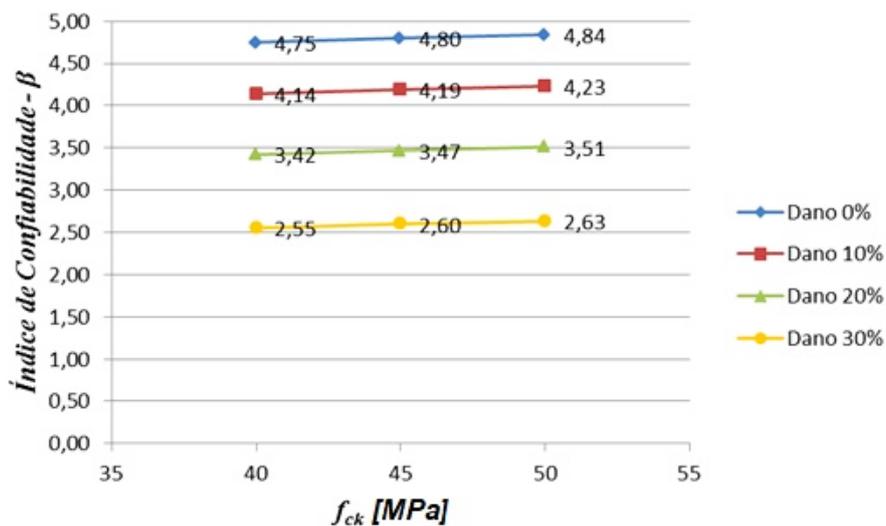


Figura 8. Variação de $\beta \times f_{ck}$ ($r = 0,75$).

Nas Figuras 6, 7 e 8 é possível verificar que o índice de confiabilidade das vigas aumenta conforme cresce a resistência à compressão do concreto. No entanto, a variação do índice é muito pequena, indicando que a variação isolada do f_{ck} apresenta baixa influência sobre β .

Observou-se, também, que para a relação de carregamento $r = 0,25$, a variação de β é em média de 0,03 para cada 5 MPa elevados na resistência do concreto, e conforme aumenta-se a relação r , β aumenta para um mesmo f_{ck} , no entanto as variações permanecem pequenas.

5.2. Influência da relação de carregamento r :

Foi verificada a variação de β para cada variação de r para três cenários diferentes, cada um com um valor diferente de f_{ck} , sendo plotadas curvas de acordo com o dano percentual. Nesta comparação, a influência da relação (r) entre o carregamento permanente e a carga total, é possível observar que a mudança na relação entre carregamentos promove considerável alteração no índice de confiabilidade β , conforme apresentado nas Figuras 9, 10 e 11 que ilustram estas variações.

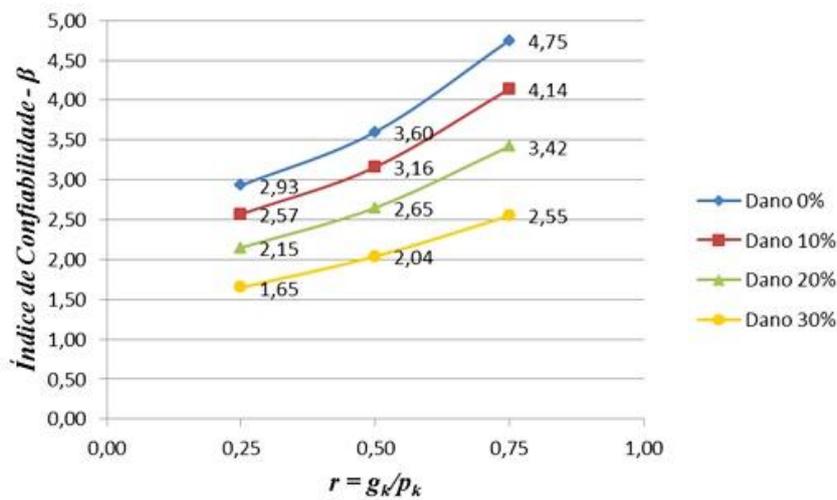


Figura 9. Variação de $\beta \times r$ ($f_{ck} = 40$ MPa).

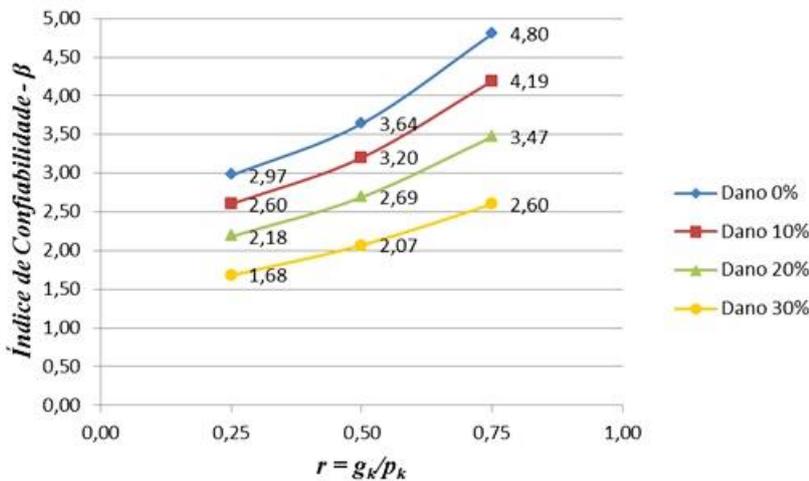


Figura 10. Variação de $\beta \times r$ ($f_{ck} = 45$ MPa).

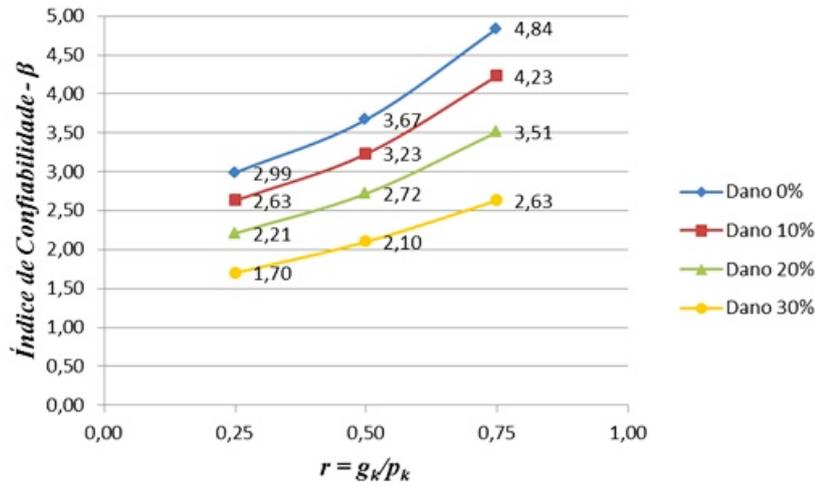


Figura 11. Variação de $\beta \times r$ (fck =50 MPa).

Observando o desenvolvimento do índice de confiabilidade β de acordo com a variação de r , pode-se verificar que este aumenta na medida em que a carga permanente passa a ser dominante. Isso pode ser verificado a partir do ponto em que as cargas apresentam o mesmo peso ($r = 0,50$), a curva tende a ter uma maior inclinação para carregamentos permanentes dominantes ($r = 0,75$) e uma menor inclinação quando o carregamento dominante é o variável ($r = 0,25$). Esse entendimento se dá visto que para a relação $r = 0,25$, a carga variável q_k corresponde à 75% do carregamento, o que dentro de uma probabilidade de valores extremos, tende a alcançar valores muito elevados, conseqüentemente reduzindo os valores de β .

5.3. Influência da redução da área efetiva de armadura (Dano%):

O último parâmetro estudado é a ocorrência de dano na armadura tracionada devido à corrosão. Aqui foram verificadas as variações do índice de confiabilidade β de acordo com a redução percentual da área efetiva de aço, sendo traçadas curvas para cada relação de carregamento (r) dentro de três diferentes cenários de resistências à compressão. Nas Figuras 12, 13 e 14 estão apresentados os resultados.

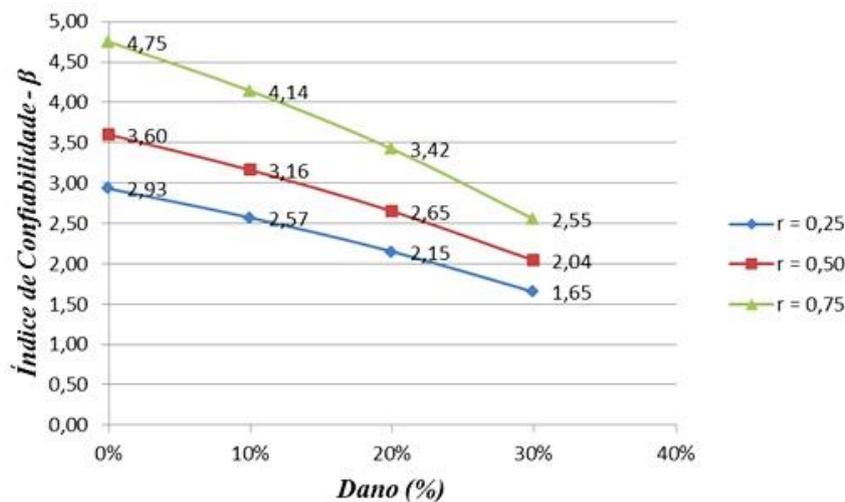


Figura 12. Variação de $\beta \times$ Dano(%) (fck = 40 MPa).

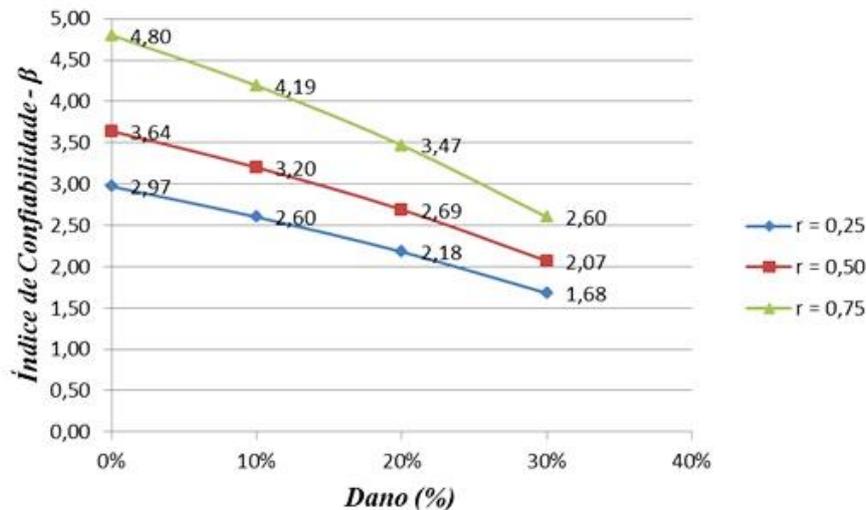


Figura 13. Variação de $\beta \times$ Dano(%) ($f_{ck} = 45$ MPa).

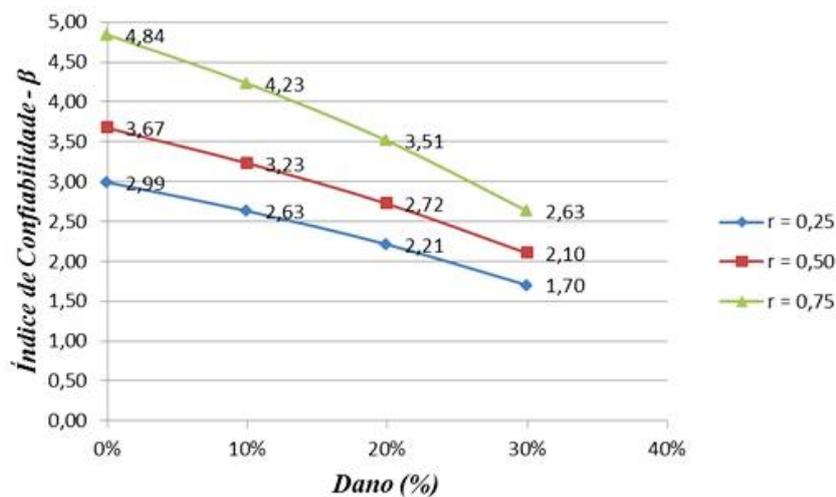


Figura 14. Variação de $\beta \times$ Dano(%) ($f_{ck} = 50$ MPa).

A redução da armadura efetiva de tração, como esperado, ocasiona a redução do índice de confiabilidade. É possível observar que para valores de $r = 0,25$, o índice de confiabilidade apresenta uma redução mais tênue, enquanto que para $r = 0,75$ a redução é mais acentuada para um mesmo percentual de dano.

6. Considerações finais

O estudo de confiabilidade de vigas de concreto armado em ambientes portuários e a avaliação dos coeficientes de segurança propostos pela NBR 6118 (ABNT, 2014) se mostraram de grande importância diante dos resultados obtidos. O presente trabalho abordou a avaliação do índice de confiabilidade de vigas isostáticas para estruturas portuárias sob o estado limite último de flexão, realizando a comparação entre a variação de diferentes parâmetros envolvidos no dimensionamento da estrutura.

Os resultados para o índice de confiabilidade foram gerados para 36 vigas, dentre as quais nove apresentaram integridade total da área efetiva de armadura tracionada (dano de 0%), e as demais tiveram essa área reduzida em percentuais de 10%, 20% e 30%, considerando um efeito de dano por corrosão.

Em um primeiro estudo paramétrico foi realizada a comparação da variação de β conforme a variação da resistência característica à compressão do concreto f_{ck} , onde se verificou que a influência deste parâmetro é pouco significativa. A baixa influência do f_{ck} em β é dada visto que no estado limite último de flexão a força resultante de compressão do concreto é menor, função da zona comprimida ser reduzida em relação à altura da seção.

Um segundo estudo paramétrico realizado se deu por meio da variação de β em função da variação da relação (r) entre o carregamento permanente e a carga total, tendo este apresentado um grande impacto na variação de β . A confiabilidade da estrutura cresce acentuadamente na medida que a carga permanente aumenta e a acidental

diminui. Isto se justifica em função do coeficiente de variação do carregamento, sendo para a carga permanente igual a 0,10 e para a carga variável 0,25. Na relação r , o valor maior da carga com o menor coeficiente de variação frente ao carregamento de maior variabilidade tende a aumentar o índice de confiabilidade.

O terceiro estudo paramétrico comparou a variação de β em função do dano percentual na área efetiva de armadura tracionada, podendo ser verificado, e como já esperada, a redução gradativa de β , visto a redução da área efetiva resistente de tração na região de maior sollicitação.

Dentre os estudos paramétricos realizados, é possível concluir que para as relações em que $r = 0,25$, todos os valores ficam abaixo do índice alvo proposto, indicando a necessidade de uma revisão dos coeficientes de segurança apresentados nas normas brasileiras para carga variável.

Em situações em que $r = 0,50$, verificou-se que os índices de confiabilidade se mantêm dentro do esperado para uma armadura tracionada íntegra, mas à medida que surge o dano estes valores saem dos limites estipulados. Já para relações de $r = 0,75$, os índices de confiabilidade são elevados, permitindo que a armadura tracionada sofra danos de até 20% para qualquer condição de f_{ck} mantendo o índice de confiabilidade dentro de parâmetros muito próximos ao estipulado.

Após a análise das 36 vigas de concreto armado dimensionadas no estado limite último de flexão segundo prescrições da NBR 6118 (ABNT, 2014), sob a atuação de carregamento pesado em ambiente de grande agressividade ambiental, foi possível estabelecer um comparativo entre a confiabilidade de vigas e a variação de parâmetros como a resistência do concreto, relação de carregamentos permanentes e variáveis e redução na área de armadura tracionada.

Em geral, os valores obtidos para o índice de confiabilidade dessas estruturas se mostraram adequados, estando dentro dos valores considerados seguros para condições de integridade estrutural. Contudo, para situações de carregamento variável elevado, os parâmetros de segurança estabelecidos pela norma brasileira não se mostraram suficientes para garantir a segurança estrutural.

Portanto, em função dos resultados obtidos e dentro de um contexto portuário, onde o grande fluxo e a aleatoriedade de cargas estão presentes, sugere-se que seja feita uma revisão dos coeficientes de segurança apresentados pela norma brasileira, entrando assim em conformidade com normas internacionais e garantindo uma maior segurança para as estruturas portuárias de nosso país.

Este trabalho sugere também que sejam incluídos na normatização brasileira, índices de confiabilidade alvo e respectivas metodologias para determinação destes, permitindo assim que projetistas possam verificar a confiabilidade das estruturas, com base em normas nacionais.

Financiamento: O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Conflito de interesses: Os autores não declaram nenhum conflito de interesses. Os financiadores não tiveram nenhuma função no desenho do estudo; na coleta, análise ou interpretação dos dados; na redação do manuscrito, ou na decisão de publicar os resultados.

Referências

1. Alencar, G.L.P. Recuperação e Reforço de Tubulões de Píer. *Revista Engenharia Estudo e Pesquisa*. 2010, v.10, n.2 cap.10.
2. Ang, A.H.; Tang, W.H. *Probability concepts in engineering planning and design. Volume II: decision, risk and reliability*. John Wiley & Sons, 1990.
3. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Projeto de estruturas de concreto – Procedimento: NBR-6118*. Rio de Janeiro, 2014.
4. Banco de Imagens Royalty Free. 123RF. <https://goo.gl/bgVFhB>, 2015.
5. Beck, A.T. *Confiabilidade e segurança das estruturas*. 1ª ed, Elsevier, 2019.
6. Bolina, F.L.; Tutikian, B.F.; Helene, P.R.L. *Patologia de estruturas*. Oficina de Textos, São Paulo, 2019.
7. Clímaco, J.C.T.S. *Estruturas de concreto armado: fundamentos de projeto, dimensionamento e verificação*. Editora UnB. Brasília, 2008.
8. Correia, R.S. Avaliação da confiabilidade de vigas otimizadas de concreto armado. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2020.
9. Galambos, T.V. *Design Codes, Engineering Safety*. MC Gral Hill, 1982.

10. Medeiros, M.H.F.; Helene, P.R.L. Durabilidade e proteção do concreto armado. Téchne, 151 ed. São Paulo, 2009.
11. Melchers, R.E. *Structural reliability analysis and prediction*. 2ª Ed. Chichester:John Wiley & Sons, Inc., 1999.
12. Moura, M.W.; Real, M.V.; Loriggio, D.D. Momento último de vigas de concreto protendido: validação e cálculo do erro do modelo. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 2018, v.11, n.7, p.307-330.
13. Nowak, A.; Szerszen, M. Calibration of Design Code for Buildings (ACI 318): Part 1 – Statistical Models for Resistance. *ACI Structural Journal*, 2003, 100(3), pp. 377-382.
14. 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. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
15. Paliga, C.M.; Real, M.V.; Campos Filho, A. Estudo da confiabilidade de vigas de concreto armado deterioradas pela agressividade do ambiente marítimo. 2008. Disponível em <http://repositorio.furg.br/handle/1/1683>.
16. Pereira, F.; Helene, P.R.L. *Guía para el diagnóstico y la intervención correctiva*. In: *Rehabilitación y mantenimiento de estructuras de concreto*. São Paulo, 2007. p. 93-140.
17. Real, M.V. Análise probabilística de estruturas de concreto armado, sob o estado plano de tensão, através do método dos elementos finitos. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
18. Rocha, R.G. Análise de confiabilidade de vigas portuárias de concreto protendido. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2014.
19. Santos, D.M.; Stucchi, F.R.; Beck, A.T. Confiabilidade de vigas projetos de acordo com as normas brasileiras. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 2014, v.7, n.5, p.723-746.
20. Veiga, J.M.G.C. Métodos de análise das incertezas na verificação da segurança estrutural em engenharia civil. 2008. Tese de Doutorado em Ciências de Engenharia, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, 2008.
21. Zhao, X.; He, X.J.; Yang, Y.C. Numerical simulation of gfrp reinforced concrete beams. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, v.2017, p.1-10.