

CONFIABILIDADE DE PILARES EXISTENTES DE CONCRETO ARMADO SUJEITOS A PERDA DE ÁREA DA ARMADURA LONGITUDINAL

Reliability of Existing Reinforced Concrete Columns Subjected To Losses in the Cross-Sectional Area of Longitudinal Steel

L. C. R e Castro (1); S. M. C. Diniz (2)

(1) (P) Engenheira Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, Brasil.

(2) Dr^a. Prof^a, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, Brasil.

Email para Correspondência: luizacrcastro@gmail.com; (P) Apresentador

Resumo: Nos dias atuais, requisitos da sustentabilidade impõem um menor consumo de matérias primas, menor geração de resíduos de demolições e menores custos ao longo da vida útil das estruturas. Tais requisitos dão grande destaque para a avaliação da condição de estruturas existentes de concreto armado com vistas à extensão da vida útil de tais estruturas e/ou adoção de medidas de reforço estrutural. A corrosão das armaduras é o principal agente causador de problemas estruturais, uma vez que a diminuição da área de seção transversal das barras conduz à diminuição da capacidade resistente. Nesta pesquisa são avaliados níveis de confiabilidade associados a pilares curtos, existentes, de concreto armado, sujeitos a carga axial, com perda de área da seção transversal da armadura longitudinal. A influência de distintos fatores (resistência à compressão do concreto, taxa de armadura longitudinal, perda de seção transversal de aço e carregamento) nos níveis de confiabilidade obtidos é discutida.

Palavras-chave: Concreto Armado; Confiabilidade Estrutural; Estruturas Existentes; Resistência à Compressão; Simulação de Monte Carlo.

Abstract: Nowadays, sustainability requirements impose lower consumption of raw materials, less generation of demolition waste and lower costs over the life of the structures. Such requirements give great highlight to the assessment of the condition of existing reinforced concrete structures with a view to extending the life cycle of such structures and/or adopting structural reinforcement measures. Corrosion of reinforcement is the main cause of structural problems, since the reduction of the cross-sectional area of the bars leads to a decrease in the resistant capacity. In this research, reliability levels associated with short, existing reinforced concrete pillars subjected to axial load with loss of cross sectional area of longitudinal reinforcement are evaluated. The influence of different factors (concrete compressive strength, longitudinal reinforcement ratio, loss of steel in the cross section and loading) on the reliability levels obtained is discussed.

Keywords: Reinforced Concrete; Structural Reliability; Existing Structures; Compressive Strength; Monte Carlo Simulation.



1 INTRODUÇÃO

O concreto armado é uma das tecnologias construtivas mais utilizadas no Brasil e também um dos maiores geradores de resíduos na construção civil. Para evitar maior consumo de materiais, diminuir o volume de resíduos despejados no meio ambiente e minimizar os custos ao longo da vida útil de estruturas é necessário que uma adequada avaliação de estruturas existentes possa ser realizada.

Na avaliação de estruturas existentes, devem ser levadas em consideração as distintas patologias que podem afetar a durabilidade das estruturas em concreto armado. No âmbito dos mecanismos causadores de degradação dentre as diversas possibilidades de ações agressivas do meio ambiente, a corrosão das armaduras é o principal agente causador de problemas estruturais, afetando diretamente a durabilidade e a vida útil das estruturas (MELCHERS, 2001). Em função da formação dos produtos da corrosão eletroquímica, há perda de aço e, portanto, diminuição da área de seção transversal das barras das armaduras, com a consequente diminuição da capacidade resistente e a redução dos níveis de segurança dos elementos estruturais.

Os pilares curtos de concreto armado sujeitos a carga axial são os componentes estruturais mais afetados pela variação da resistência dos materiais envolvidos. Ademais, considerados o modo de falha e a importância de tais componentes para a integridade estrutural, a confiabilidade de pilares de concreto armado deve ser avaliada. Sendo assim, o objetivo principal da pesquisa aqui apresentada é a avaliação da confiabilidade de pilares curtos, existentes, de concreto armado, submetidos a cargas de compressão centradas e que sofreram perdas na seção transversal de aço.

Desse modo, neste trabalho são identificadas e discutidas as particularidades associadas à avaliação da confiabilidade de pilares existentes de concreto armado, através do tratamento probabilístico do problema. As variáveis pertinentes (resistência à compressão do concreto, resistência ao escoamento do aço, geometria da seção transversal, erro do modelo e cargas atuantes) são tratadas como variáveis aleatórias e um procedimento computacional utilizando a Simulação de Monte Carlo (DINIZ e FRANGOPOL, 1997) foi implementado no software MATLAB a fim de verificar a influência de diferentes porcentagens de perda na área de aço nos níveis de confiabilidade implícitos em normas específicas para o reparo de estruturas existentes.

2 ESTRUTURAS EXISTENTES

A avaliação de segurança das estruturas existentes é distinta daquela relacionada à implementação de segurança no projeto de novas estruturas. Embora as normas de projeto para novas estruturas considerem incertezas nos processos de projeto e construção, muito do que era inicialmente incerto não mais será na estrutura acabada (MELCHERS, 2001).

No entanto, mesmo que as estruturas existentes passem por múltiplas investigações, algumas incertezas nas principais variáveis relacionadas ao desempenho estrutural continuarão

a existir. A determinação dos valores reais de vários parâmetros (por exemplo, resistência à compressão de concreto in situ, módulo de elasticidade do concreto, etc.) na estrutura existente introduz incerteza própria. Assim, da mesma forma que no projeto de novas estruturas, as incertezas associadas às variáveis básicas que descrevem ações, propriedades de materiais, geometria e erros de modelo relacionados a estruturas existentes devem ser levadas em conta. Nesse sentido, avaliações realistas de desempenho estrutural podem ser estabelecidas apenas em termos probabilísticos (BADIMUENA, 2017).

3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO EM ESTRUTURAS EXISTENTES

Na avaliação de estruturas existentes, faz-se necessário estimar a resistência in situ da estrutura já construída a partir da resistência de seus materiais constituintes. A resistência do concreto obtida in loco depende de vários fatores, incluindo as proporções das misturas, as condições de cura, o grau de adensamento e a deterioração ao longo do tempo, portanto a influência destes fatores deve ser levada em conta. É de grande importância que a resistência obtida de ensaios em testemunhos represente com precisão aceitável a resistência efetiva na estrutura avaliada. É aconselhável que seja dado um tratamento probabilístico aos resultados obtidos através de testemunhos para estabelecer uma resistência característica para verificações conceitualmente equivalente àquela utilizada no projeto de estruturas novas.

Para estruturas existentes, há certa dificuldade em obter um valor equivalente para uso nas equações de verificação da segurança estrutural, pois na definição de um valor equivalente deve-se levar em conta as particularidades da estimativa da resistência in loco. O ACI 562 (2013) sugere a seguinte expressão para determinar a resistência à compressão característica equivalente, f_{ckeq} , utilizável nas equações convencionais de projeto de estruturas para fins de verificação:

$$f_{ckeq} = 0,9f_{cm} \left[1 - 1,28 \sqrt{\frac{(k_c V)^2}{n} + 0,0015} \right] \quad (1)$$

em que: f_{ckeq} é a resistência característica equivalente do concreto, f_{cm} é a resistência média dos testemunhos modificada para descontar os efeitos do diâmetro e da umidade, V é o coeficiente de variação da resistência dos testemunhos, n o número dos testemunhos extraídos utilizado para estimar f_{cm} e k_c é o um fator de modificação para o coeficiente de variação dependente de n .

4 TENSÃO ESCOAMENTO DO AÇO

Para caracterizar o aço de armaduras de estruturas existentes, o ACI 562(1) exige a remoção de um mínimo de três amostras para ensaios de laboratório. Após o ensaio, a resistência ao escoamento característica equivalente do aço de armaduras de estruturas existentes deve ser determinada. A resistência ao escoamento característica equivalente do aço, f_{yeq} , é definida pela expressão:

$$f_{yeq} = (f_{ym} - 24) \times \text{Exp}(-1,3k_s V_s) \quad (2)$$

em que: f_{yeq} é a resistência ao escoamento característica equivalente do aço, f_{ym} é a resistência ao escoamento média do aço obtida do ensaio e expressa em MPa, V_s é a média dos coeficientes de variação determinada a partir do ensaio e k_s é o fator de modificação do coeficiente de variação do aço, que depende do número de testemunhos obtidos.

5 CONFIABILIDADE ESTRUTURAL

A Confiabilidade Estrutural tem como principal objetivo determinar a probabilidade de ocorrência de um cenário de desempenho insatisfatório da estrutura ou componente estrutural, visto que sempre haverá uma probabilidade não nula da estrutura ter um desempenho insatisfatório durante sua vida útil. A Confiabilidade Estrutural pode ser modelada como um problema suprimento vs. demanda. A variável aleatória margem de segurança, M , pode ser definida como a diferença entre a resistência R da estrutura (suprimento), e a solicitação S (demanda), à qual a estrutura é submetida, ou seja:

$$M = R - S = R - (G + Q) \quad (3)$$

em que G é a parcela permanente do carregamento e Q a carga variável.

Para o caso em que R e S seguem distribuições normais, a margem de segurança M , também seguirá uma distribuição normal com parâmetros média (μ_M) e o desvio padrão (σ_M). Neste caso, a probabilidade de falha P_f será dada por:

$$P_f = P(M < 0), \text{ ou seja } P_f = \Phi\left(-\frac{\mu_M}{\sigma_M}\right) \quad (4)$$

em que Φ é a função de probabilidade acumulada da variável normal padrão. A razão μ_M/σ_M fornece um indicativo do nível de confiabilidade da estrutura, sendo conhecido como índice de confiabilidade β :

$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} \quad (5)$$

Um conceito importante no projeto semi-probabilístico é o índice de confiabilidade alvo (β_{alvo}) utilizado no processo de calibração de normas (DINIZ e FRANGOPOL, 1997). Para



pilares curtos de concreto armado com falha à compressão, sugere-se o índice de confiabilidade alvo igual a 3,4 para o caso de projeto de estruturas novas (JCSS, 2001). No caso de estruturas existentes não existe consenso sobre o índice de confiabilidade alvo a ser utilizado, entretanto distintos aspectos, --econômicos, sociais e de sustentabilidade--, apontam para a necessidade de que sejam aceitos índices de confiabilidade inferiores àqueles tomados como referência para estruturas novas.

6 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE PILARES EXISTENTES - METODOLOGIA

Neste trabalho, a simulação de Monte Carlo foi utilizada na avaliação dos níveis de confiabilidade de pilares existentes de concreto armado, curtos, e com carregamento centrado. Para tal, pilares representativos dos distintos parâmetros investigados foram selecionados, as estatísticas das variáveis básicas relativas à resistência e ao carregamento foram definidas e uma função de desempenho caracterizando a falha ou sobrevivência do pilar foi estabelecida.

6.1 DESCRIÇÃO DOS PILARES ANALISADOS

Os pilares considerados foram definidos e analisados seguindo as prescrições do ACI 562 (2016) quanto à armadura mínima e às dimensões mínimas da seção transversal. Foram estudados pilares com seção transversal de dimensões 30x30cm, e considerados três valores da resistência à compressão do concreto (resistência média, f_{cm} : 15, 30, 50 MPa) e três taxas de armadura longitudinal ($\rho = 1\%$, 2% e 4%) com perdas de área transversal de aço (10%, 20%, 30% e 50%). Vale ressaltar que a perda de 50% foi incluída apenas como base teórica de comparação, uma vez que um nível de corrosão tão alto possivelmente daria origem a outros fenômenos como o deslocamento do concreto de cobertura, a flambagem das armaduras longitudinais, perda de aderência entre o aço e o concreto, etc. Adicionalmente, foi assumido que as informações relativas à resistência dos materiais envolvidos são provenientes de testemunhos em número igual a 3, número mínimo recomendado pelo ACI 562. Considerando-se que os máximos efeitos da redução da resistência à compressão do concreto são obtidos para pilares com seção transversal uniformemente comprimida, a consideração de uma excentricidade mínima não foi incorporada na análise.

6.2 ESTATÍSTICAS DAS VARIÁVEIS BÁSICAS

As estatísticas das variáveis básicas pertinentes ao problema e consideradas nesta pesquisa estão apresentadas na Tabela 1. Foi assumido que o carregamento total atuando sobre o pilar é constituído por cargas permanentes e variáveis, em proporções definidas pela razão média da carga permanente/ média da carga variável, r , iguais a 0,5, 1,0 e 2,0. As estatísticas associadas às cargas permanentes e cargas variáveis são obtidas a partir do procedimento apresentado em Galambos *et al.* (1982) e adaptado para pilares avaliados segundo o ACI 562



(2016), conforme descrito em Badimuena (2017). Neste procedimento, as informações relativas à relação média/valor característico do carregamento são necessárias. Essas informações, assim como o coeficiente de variação e tipo de distribuição associados a cargas permanentes e variáveis são apresentados em JCSS (2001).

Tabela 1 – Estatísticas das variáveis básicas

Variável aleatória	Média	COV	Tipo de Distribuição	Referência
Resistência à compressão do concreto (F_c)	15, 30 e 50 MPa	10%	Lognormal	Assumida
Resistência ao escoamento do aço (F_y)	572,5 MPa	10%	Lognormal	Assumida
Base (B)	30 cm	1,93%	Normal	Lorenzini e Diniz (2010)
Altura (H)	30 cm	1,93%	Normal	Lorenzini e Diniz (2010)
Erro do modelo (E_M)	1,0	11%	Normal	Galambos et al. (1982)
Carga permanente (G)	Variável	10%	Normal	JCSS (2001)
Carga variável (Q)	Variável	25%	Gumbel	JCSS (2001)

As variáveis básicas pertinentes à resistência do pilar foram tomadas como aquelas associadas à resistência dos materiais (concreto e aço), à geometria da seção transversal (base e altura) e ao erro associado ao modelo de cálculo empregado na predição da resistência do pilar. Vale ressaltar que os três níveis de resistência à compressão do concreto considerados nesta pesquisa (15, 30 e 50 MPa) foram tomados como representativos da média obtida a partir de testemunhos, isto é, f_{cm} , e não da resistência equivalente (ver Eq. 1). Já o correspondente coeficiente de variação assumido (tomado igual a 10%) representa um possível cenário, embora tantos outros com maior ou menor variabilidade possam igualmente representar o problema em consideração.

6.3 FUNÇÃO DE DESEMPENHO

No caso dos pilares estudados, a equação de desempenho que descreve a interação entre a resistência do pilar (R) e os efeitos do carregamento ao qual está sujeito (S) pode ser escrita como:

$$g(X) = [\alpha_c F_c (A_g - A_s) + F_y A_s] E_M - (G + Q) \quad (6)$$

em que $g(X)$ é a variável aleatória que permite avaliar o desempenho do pilar, F_c é a variável aleatória correspondente à resistência à compressão do concreto, A_g é a variável aleatória correspondente a área bruta da seção transversal, A_s é a variável determinística que representa a área total das armaduras de aço, F_y é a variável aleatória correspondente resistência ao escoamento do aço, G e Q são as variáveis aleatórias que representam os efeitos do carregamento (carga permanente e sobrecarga respectivamente), E_M a variável aleatória que representa o erro do modelo e α_c é um fator determinado em função da classe do concreto.



6.4 PROBABILIDADE DE FALHA VIA SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

A simulação de Monte Carlo foi utilizada para calcular a probabilidade de falha associada a cada pilar em análise. Assim, a função de desempenho dada pela Eq. (6) foi avaliada num total de 1.000.000 de simulações. Nos casos em que o valor encontrado para a função de desempenho é negativo, fica caracterizada a falha do pilar. A probabilidade de falha, P_f , é obtida a partir do quociente entre o número de falhas, n_f , e o número de simulações. Uma vez obtida a probabilidade de falha associada a cada pilar, o correspondente índice de confiabilidade, β , pode ser obtido a partir da Eq. 5. A obtenção do índice de confiabilidade é de interesse uma vez que esta métrica, e não a probabilidade de falha, vem sendo utilizada no processo de calibração de normas.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos para a probabilidade de falha e o correspondente índice de confiabilidade para os grupos de pilares denominados Pilar 1 ($f_{cm} = 15$ MPa) e Pilar 2 ($f_{cm} = 30$ MPa) são apresentados nas Figs. I e II, respectivamente. Cada grupo contém 45 pilares correspondentes a 3 razões de carregamento, 3 taxas de armadura longitudinal e 5 níveis de perda de seção transversal de aço, o que para efeitos de referência inclui uma “perda” nula. O eixo horizontal dos gráficos representa a razão r entre carga permanente e carga variável.

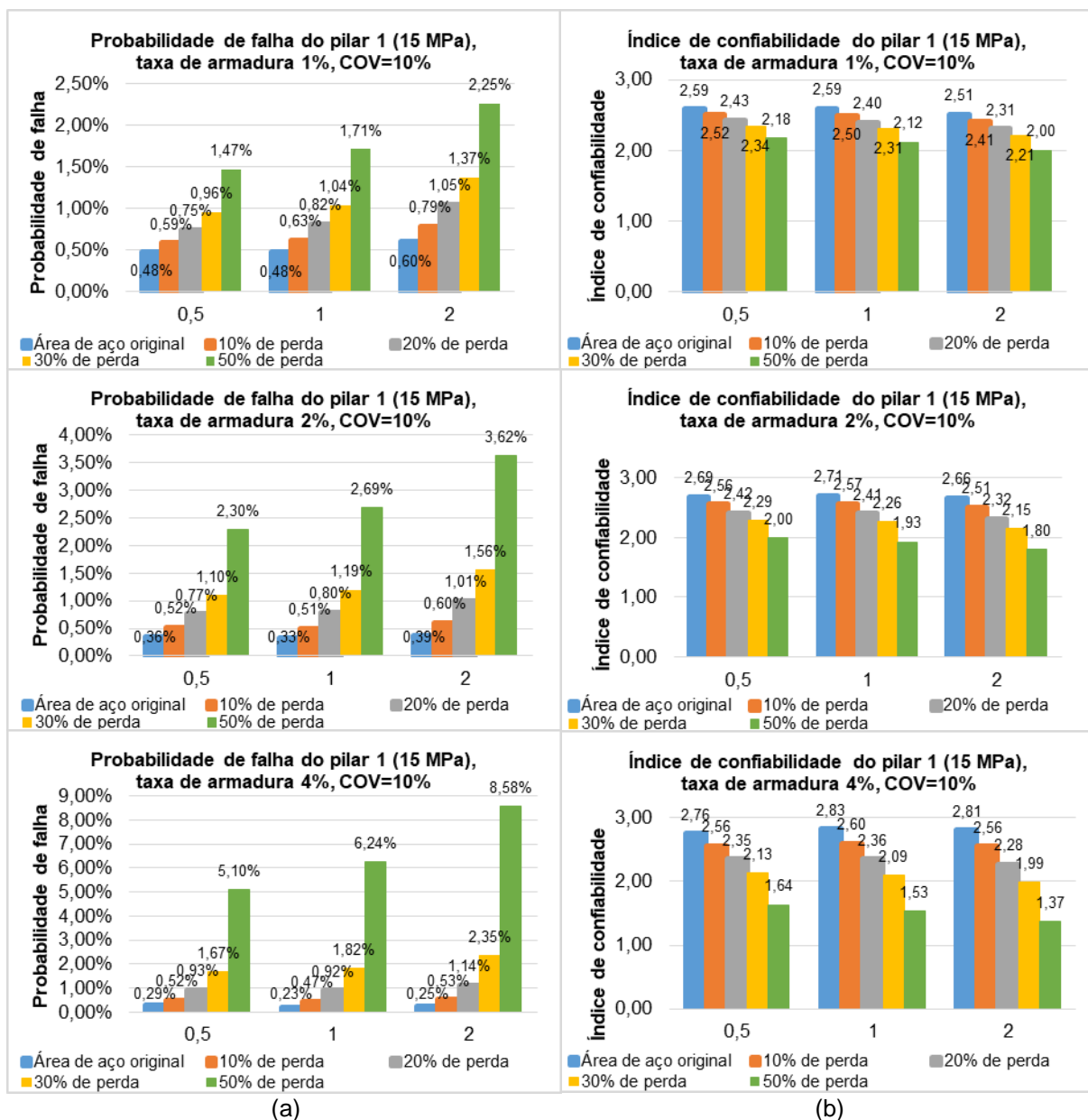


Figura I – Pilar 1, $f_{cm} = 15$ MPa, $\rho = 1, 2$ e 4%: (a) Probabilidades de falha; (b) Índices de confiabilidade

Fonte: Autor (2018)

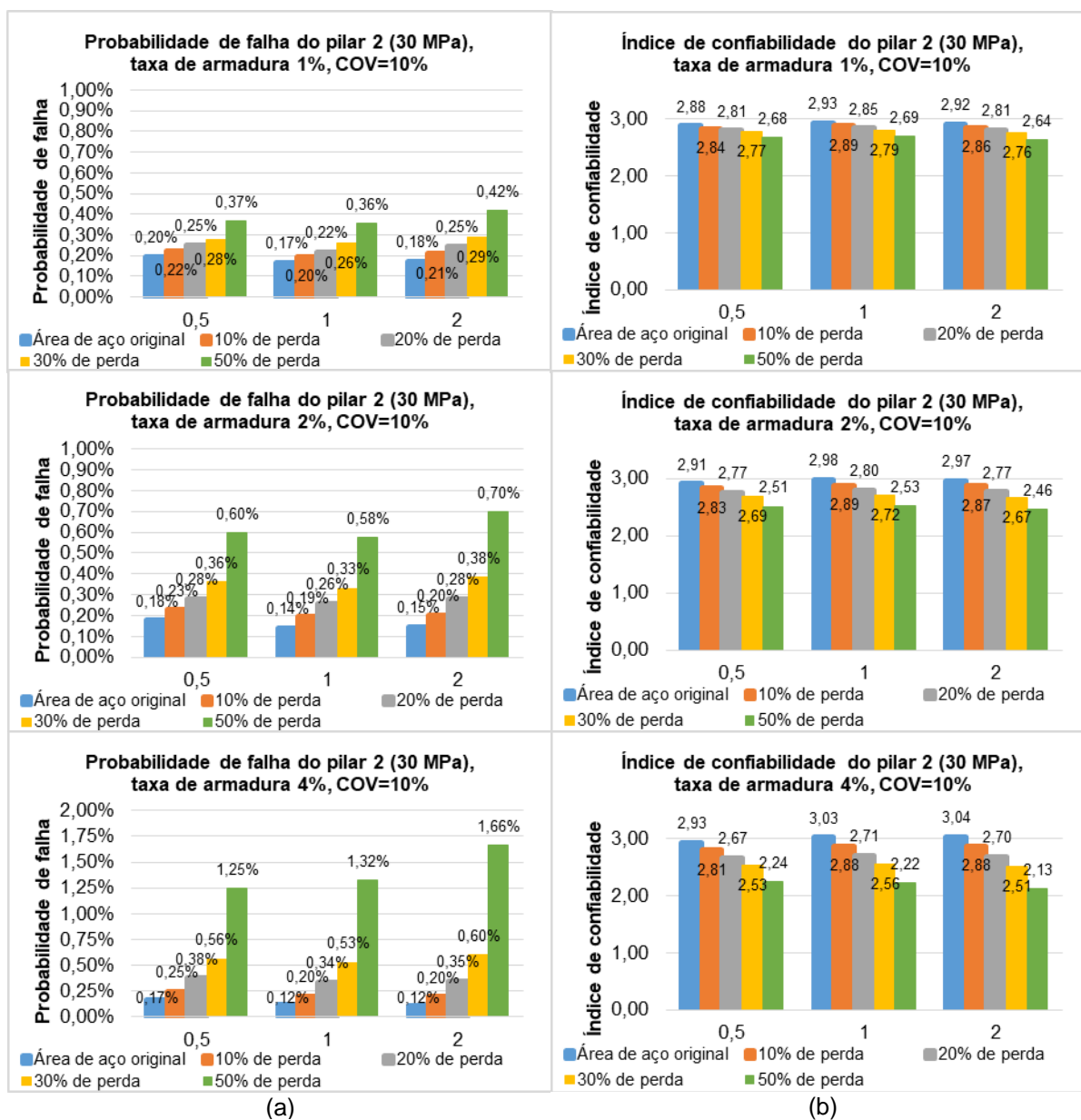


Figura I - Pilar 2, $f_{cm} = 30$ MPa, $\rho = 1, 2$ e 4%: (a) Probabilidades de falha; (b) Índices de confiabilidade

Fonte: Autor (2018)



Para efeitos de brevidade os resultados correspondentes ao grupo de pilares com $f_{cm} = 50$ MPa não será aqui apresentado. Os resultados sumarizados nas Figs. I e II apontam que todos os parâmetros investigados (resistência à compressão do concreto, razão do carregamento, taxa de armadura longitudinal e perda de seção transversal de aço) têm uma significativa importância nos níveis de confiabilidade observados. É importante ressaltar que nas Figs. I e II, enquanto a mesma escala é utilizada na apresentação dos índices de confiabilidade, o mesmo não foi feito na apresentação das probabilidades de falha. Isto decorre do fato de que grandes variações na probabilidade de falha resultam em pequenas variações no índice de confiabilidade conforme definido pela Eq. 5.

Com relação à resistência à compressão do concreto, observa-se que um aumento desta resistência conduz a uma significativa redução da probabilidade de falha. Por exemplo, para $r = 0,5$, $\rho = 1\%$ e perda de 20%, $P_f = 0,0075$ e $0,0025$ para $f_{cm} = 15$ e 30 MPa, respectivamente. Probabilidades de falha acima de $0,01$ foram obtidas para várias condições associadas a uma maior perda da seção transversal de aço nos pilares com $f_{cm} = 15$ MPa.

O aumento da razão entre a carga permanente e a carga variável, tende a diminuir a probabilidade de falha, uma vez que a variabilidade das cargas permanentes, representada pelo seu coeficiente de variação (ver Tabela 1), é menor que a variabilidade das cargas variáveis. Para tal também contribui o comportamento da cauda superior das respectivas distribuições de probabilidade com a distribuição de Gumbel (cargas variáveis) apresentando uma cauda mais pronunciada do que a distribuição normal (cargas permanentes). Por exemplo, para $f_{cm} = 15$ MPa, $\rho = 1\%$ e perda de 20%, $P_f = 0,0075$ e $0,0105$ para $r = 0,5$ e $2,0$, respectivamente.

Para os pilares sem perda de área da seção transversal da armadura longitudinal observa-se um pequeno decréscimo na probabilidade de falha à medida que a taxa de armadura longitudinal cresce. Para armadura intacta $f_{cm} = 30$ MPa, $r = 1,0$, $P_f = 0,0017$, $0,0014$ e $0,0012$ para $\rho = 1$, 2 e 4% , respectivamente. Entretanto, à medida que ocorre perda da seção transversal de aço esta situação é alterada com a probabilidade de falha crescendo à medida que cresce a taxa de armadura longitudinal. No caso anterior, agora considerada uma perda da seção transversal de aço igual a 20%, $P_f = 0,0022$, $0,0026$ e $0,0034$ para $\rho = 1$, 2 e 4% , respectivamente.

A perda de seção transversal de aço tem maior impacto para os pilares com menor resistência à compressão do concreto. Para $r = 2,0$, $\rho = 4\%$ e 30% de perda, $P_f = 0,0235$ e $0,0060$ para $f_{cm} = 15$ e 30 MPa, respectivamente. A condição extrema é observada para o pilar com $f_{cm} = 15$ MPa, $r = 2,0$, $\rho = 4\%$ e perda de seção transversal de aço igual a 50%. Neste caso a probabilidade de falha é de $0,0856$, sendo que para a armadura não deteriorada esta probabilidade é de $0,0025$, ou seja a probabilidade de falha da estrutura deteriorada é 34 vezes superior àquela da estrutura sem perda de seção transversal da armadura de aço.

Observa-se que em todos os casos analisados, os índices de confiabilidade obtidos são inferiores ao valor alvo definido para estruturas novas ($\beta_{alvo} = 3,4$). Isto ocorre mesmo nos casos em que não há perda de área da seção transversal de aço. Tal condição decorre da introdução de erros amostrais na análise apresentada nesta pesquisa o que aumenta a variabilidade dos resultados obtidos para a resistência do pilar a partir da avaliação da resistência dos materiais envolvidos através do ensaio de testemunhos.



8 CONCLUSÃO

Todos os parâmetros investigados (resistência à compressão do concreto, razão do carregamento, taxa de armadura longitudinal e perda de seção transversal de aço) têm uma significativa importância nos níveis de confiabilidade observados. As análises apresentadas contemplaram a condição mais restritiva quanto à consideração de erros amostrais no cálculo da resistência equivalente tanto para o concreto quanto para o aço, adotando o menor número de testemunhos ($n = 3$), para os dois materiais. A perda de seção transversal de aço tem maior impacto para pilares com menor resistência à compressão do concreto. Esta condição é de particular interesse uma vez que as estruturas que mais apresentam demandas para a sua avaliação/recuperação são aquelas que já ultrapassaram ou se aproximam de sua vida útil de projeto, estruturas produzidas com concretos de menor resistência característica. Para os pilares sem perda de área da seção transversal da armadura longitudinal observa-se um pequeno decréscimo na probabilidade de falha à medida que a taxa de armadura longitudinal cresce. Entretanto, à medida que ocorre perda da seção transversal de aço esta situação se inverte com a probabilidade de falha crescendo à medida que cresce a taxa de armadura longitudinal.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa durante parte do período de realização dessa pesquisa e à UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais) e seu corpo docente pela infraestrutura e apoio no desenvolvimento deste artigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *ACI 562: Code Requirements for Assessment, Repair, and Rehabilitation of Existing Concrete Structures*. Farmington Hills, 2016.
- BADIMUENA, B. L., DINIZ, S. M. C. Code development for existing structures: influence of concrete strength statistics. *Maintenance, Safety, Risk, Management and Life-Cycle Performance of Bridges*. CRC Press/Balkema, 2018.
- DINIZ, S. M. C. Structural Reliability: Rational Tools for Design Code Development. *Crossing Borders: 2008 Structures Congress*. Reston, EUA, ASCE, 2008.
- DINIZ, S. M. C., FRANGOPOL, D. M. Reliability Bases for High-Strength Concrete Columns, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, v. 123, n. 10, 1997.
- GALAMBOS, T.V., ELLINGWOOD, B., MACGREGOR, J.G., CORNELL, C.A. Probability-based load criteria: assessment of current design practice, *Journal of the Structural Division*, ASCE, EUA, v. 108, n. ST5, 1982.



JOINT COMMITTEE ON STRUCTURAL SAFETY. *Probabilistic Model Code*. JCSS internet publication, 2001. <http://www.jcss.ethz.ch/>

LORENSINI, R. V. e DINIZ, S. M. C. Probabilistic modeling of service life of reinforced concrete structures under corrosion. In: *2nd International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering. Life-Cycle of Civil Engineering Systems*, 2010.

MELCHERS, R. E. Assessment of Existing Structures – Approaches and Research Needs, *Journal of Structural Engineering*, v. 127, n. 4, 2001.