



CONFIABILIDADE DE PILARES DE CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA PROJETADOS DE ACORDO COM A NBR-6118:2014

Alexandra Pinto Damas

alexandrapdamas@gmail.com

Mestranda, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFRGS

Américo Campos Filho

americo@ufrgs.br

Professor Doutor, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFRGS

Avenida Osvaldo Aranha, 9500 - Centro Histórico, Porto Alegre - RS, 90035-190, Brasil

Mauro de Vasconcellos Real

mauroreal@furg.br

Professor Doutor, Escola de Engenharia – FURG

Resumo. A nova norma NBR-6118:2014, Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, traz recomendações para o dimensionamento de estruturas de concreto com resistência característica à compressão (f_{ck}) superior a 50 MPa, às quais não faziam parte de sua versão anterior NBR-6118:2007. O objetivo deste trabalho é avaliar, por meio da modelagem numérica, a confiabilidade de pilares de concreto armado projetados de acordo com estas novas especificações. Inicialmente foi realizada a validação de um modelo numérico de elementos finitos que representasse o comportamento de pilares esbeltos de concreto armado. Após, considerando-se a variabilidade das resistências dos materiais e das dimensões da seção transversal, o método de Monte Carlo é empregado, determinando o valor médio, o desvio padrão e a distribuição de probabilidade da capacidade resistente destes pilares. Finalmente, combinando-se as propriedades da distribuição de probabilidade da capacidade resistente destes pilares com as propriedades estatísticas do carregamento, foram determinados os índices de confiabilidade de diversos tipos de pilares, variando-se a resistência à compressão do concreto, o índice de esbeltez, a excentricidade relativa de primeira ordem, a taxa de armadura e a relação entre as parcelas variável e permanente do carregamento. Assim, através de modelos matemáticos implementados computacionalmente, é possível analisar a confiabilidade de pilares projetados para diferentes situações.

Palavras-Chave: Confiabilidade, Pilares; Modelagem.

INTRODUÇÃO

Recentemente, a norma brasileira para o Projeto de Estruturas de Concreto (NBR-6118:2014) teve sua aplicabilidade estendida de concretos de valor característico de resistência à compressão de 50 MPa para 90 MPa. O objetivo deste trabalho é analisar a confiabilidade de pilares esbeltos para concretos de alta resistência.

Foi observada que a qualidade dos materiais utilizados em estruturas sofreu uma grande melhora nos últimos 30 anos, e isso reflete na redução dos coeficientes de variação e aumento dos fatores de segurança (Nowak e Szerszen, 2003). Desta forma, é necessário fazer um estudo sobre a confiabilidade de estruturas de concreto armado.

O concreto de alta resistência, em muitos aspectos, comporta-se de forma diferente de um concreto normal. Menor microfissuração, maior módulo de elasticidade, maior resistência e menor ductilidade são algumas de suas propriedades. Um maior conhecimento sobre o concreto de alta resistência foi adquirido nos últimos anos, mesmo assim, o efeito da esbeltez em pilares, por exemplo, continua sendo um assunto controverso. (Diniz, 1997)

Segundo Nogueira (2006), a análise de confiabilidade demanda o conhecimento das ações consideradas no projeto, seus valores e critérios de combinação. É necessário conhecer também os materiais que serão utilizados nos projetos de pilares e suas características mecânicas.

Este trabalho propõe um modelo para análise não-linear de pilares de concreto de alta resistência, sendo este validado por dados experimentais, determinando, também, o erro do modelo. Assim, é feito um estudo paramétrico com os fatores que afetam a confiabilidade dos pilares: a resistência à compressão do concreto; a razão entre a carga permanente e a carga total; a taxa de armadura; a excentricidade inicial; e a esbeltez do pilar.

Os parâmetros estatísticos de resistência são calculados primeiramente utilizando o método de Monte Carlo, para então estabelecer as funções de estado limite. Este método é o modo mais simples de realizar uma análise probabilística, e por essa razão é utilizado de forma ampla. No método de Monte Carlo, as propriedades dos materiais, as cargas e outras variáveis são introduzidas por uma simulação computacional, sem uma significativa modificação do algoritmo usado em uma análise determinística. Além disso, este método é estatisticamente consistente. (Araújo, 2001)

Com isso, é possível verificar se a NBR-6118:2014 atende de forma adequada a problemática de pilares esbeltos de concreto de alta resistência, que justamente por suas propriedades geométricas e físicas se torna um problema mais complexo.

1 METODOLOGIA

Como forma de verificar a confiabilidade de pilares de concreto de alta resistência projetados de acordo com a NBR-6118:2014, foram adotados pilares birrotulados com seção transversal quadrada de dimensões 40 x 40 cm. Sendo variáveis a resistência à compressão do concreto em 30 MPa, 60 MPa e 90 MPa; a razão entre a carga permanente e a carga total ($r = G/G+Q$) em 0,25, 0,50 e 0,75; a taxa de armadura (ρ) de 2% e 4%; a excentricidade relativa de primeira ordem (e_1/h) em 0,1 e 0,2; e a esbeltez do pilar (λ) em 30, 60 e 90.

Neste trabalho, o pilar é modelado com o emprego de elemento finitos para pórticos planos, com dois nós e três graus de liberdade por nó, conforme apresentado na Fig. 1.

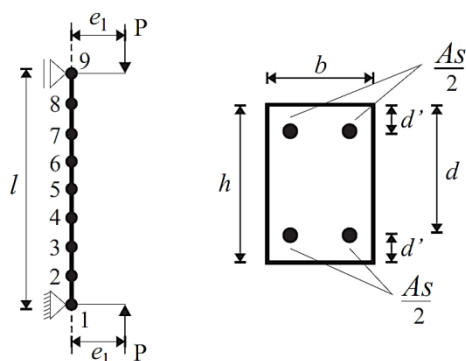


Figura 1 – Geometria da seção, modelo de carregamento e discretização do eixo do pilar em elementos finitos

O sistema de equações não-lineares, devido às não-linearidades física e geométrica, é resolvido iterativamente através do método quase-Newton BFGS que, por não necessitar de segundas derivadas, é mais eficiente que os métodos de Newton. O carregamento é aplicado em pequenos incrementos até a ruptura do pilar, obtendo-se assim sua carga de ruptura naquela simulação.

É admitido que o momento fletor cresça proporcionalmente à carga axial aplicada, ou seja, a excentricidade inicial (e_i) é considerada constante. Em termos de excentricidade relativa (e/h) pode-se definir a função estado limite (função de desempenho) conforme Eq. (1) cuja representação está apresentada esquematicamente na Fig. 2.

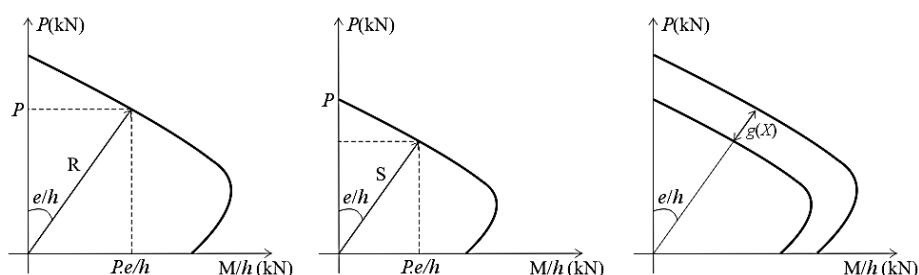


Figura 2 – Obtenção da função de desempenho (Nogueira, 2006)

$$g(\mathbf{X}) = R - S = \left[P^2 + \left(\frac{P \cdot e}{h} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \left\{ (G + Q)^2 + \left[(G + Q) \frac{e}{h} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Onde:

- $\mathbf{X}$ é o vetor das variáveis básicas do problema (carga de ruptura e carregamentos);
- P é a carga de ruptura do pilar obtida via simulação para uma excentricidade e ;
- G e Q são, respectivamente, as cargas permanentes e variáveis atuantes no pilar.

Na situação de excentricidade constante adotada, a carga de ruptura do pilar (P) e as cargas atuantes (G e Q) não são correlacionadas, admitindo o tratamento em separado. Esta situação permite a obtenção dos parâmetros da carga de ruptura (resistência do pilar) via simulação de Monte Carlo.

Desta forma, um conjunto de valores de resistência de ruptura do pilar é gerado pelo método de Monte Carlo considerando-se as propriedades das variáveis de entrada geradas em cada simulação. As variáveis aleatórias consideradas são detalhadas a seguir:

- *Armadura*: foi utilizado como referência um aço de classe CA-50, com coeficiente de variação de tensão de escoamento igual a 0,05. O módulo de elasticidade longitudinal do aço E_s foi considerado constante e igual a 210 GPa.

- *Seção transversal*: foram admitidos os valores característicos das dimensões da seção transversal dos pilares como iguais os valores nominais determinados em projeto. O desvio padrão considerado foi de 0,50 cm em todas as dimensões.

- *Carregamento permanente*: foi admitido um carregamento permanente com distribuição normal de probabilidade com valor médio 5 % maior do que o valor característico adotado ($G_m = 1,05.G_k$) e seu coeficiente de variação igual a 0,10.

- *Carregamento acidental*: foi considerada como uma distribuição de probabilidade de valores extremos do tipo I (Gumbel), com valor característico igual à média ($Q_m = Q_k$) e coeficiente de variação de 25 % (Galambos *et al.*, 1982).

- *Estimativa de erro do modelo*: a estimativa de diferenças proporcionadas pela avaliação numérica da carga de ruptura dos pilares foi realizada segundo as recomendações apresentadas por Mirza e Skrabek (1992). Foi admitido um erro do modelo com uma distribuição normal de probabilidades, média unitária e coeficiente de variação igual a 0,088, obtidas a partir de análise comparativa baseada em ensaios experimentais de diversos autores.

Assim, o índice de confiabilidade (β) foi determinado, a partir do conjunto de resultados de carga de ruptura obtidos por simulações de Monte Carlo.

2 RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados obtidos pela análise de confiabilidade dos pilares com os parâmetros considerados, levando em consideração dois diferentes métodos para o cálculo do esforço normal: Método da Curvatura Aproximada (MCA) e Método da Rigidez Aproximada (MRA).

A Fig. 3 apresenta a variação do índice de confiabilidade em função da resistência à compressão do concreto considerando-se a razão entre a carga permanente e a carga total (r) igual a 0,25, 0,50 e 0,75. Para o pilar analisado: $\rho = 2\%$, $e_1/h = 0,2$ e $\lambda = 60$.

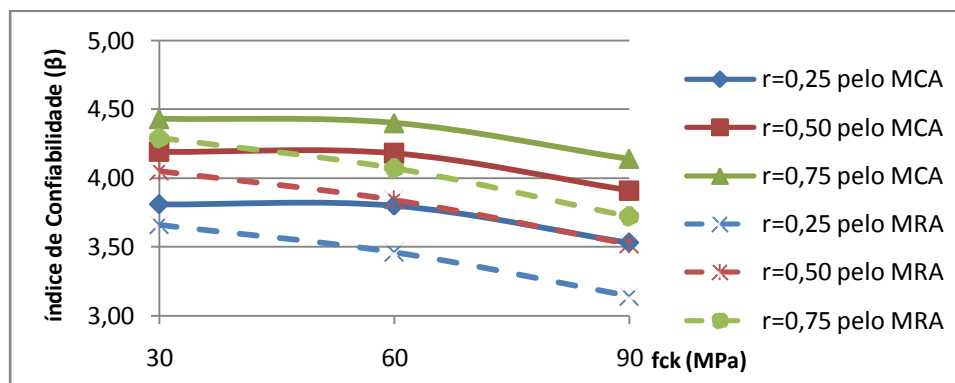


Figura 3 - Análise da variação da razão entre a carga permanente e carga total

A Fig. 4 apresenta a variação do índice de confiabilidade em função da resistência à compressão do concreto considerando-se a taxa de armadura (ρ) igual a 2% e 4%. Para o pilar analisado: $r = 0,75$, $e_1/h = 0,2$ e $\lambda = 60$.

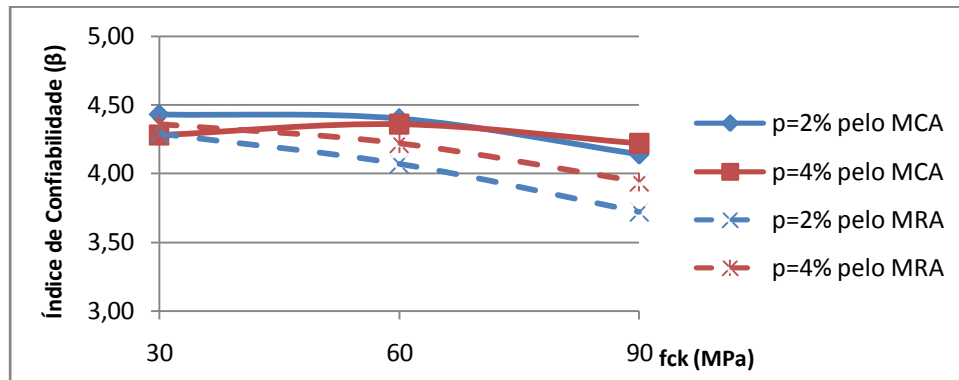


Figura 4 - Análise da variação taxa de armadura

A Fig. 5 apresenta a variação do índice de confiabilidade em função da resistência à compressão do concreto considerando-se a excentricidade relativa de primeira ordem (e_1/h) igual a 0,1 e 0,2. Para o pilar analisado: $r = 0,75$, $\rho = 2\%$ e $\lambda = 60$.

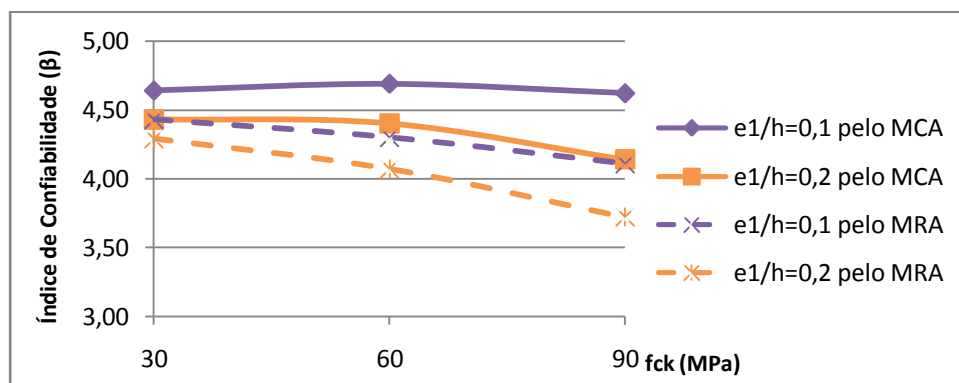


Figura 5 - Análise da variação da excentricidade relativa de primeira ordem

A Fig. 6 apresenta a variação do índice de confiabilidade em função da resistência à compressão do concreto considerando-se a esbeltez (λ) igual a 30, 60 e 90. Para o pilar analisado: $r = 0,75$, $\rho = 2\%$ e $e_1/h = 0,2$.

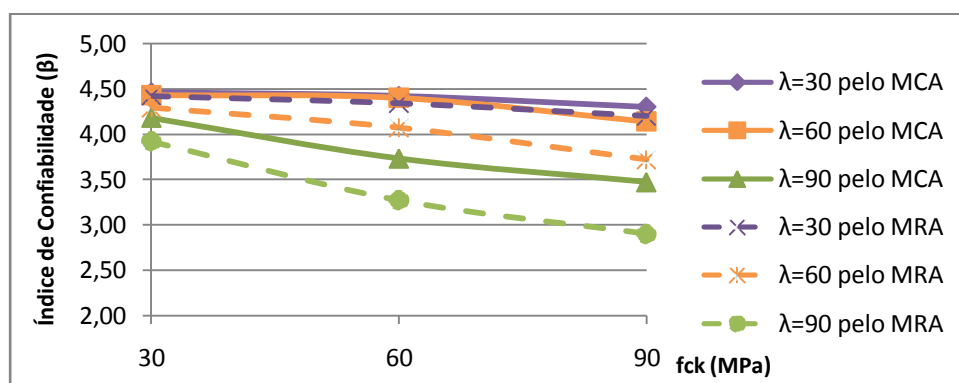


Figura 5 - Análise da variação da esbeltez

3 CONCLUSÕES

Utilizando a nova metodologia de cálculos da norma NBR-6118:2014, foi observado que:

- Quanto maior a carga permanente em relação à carga total, maior a confiabilidade do pilar;
- Pelo Método da Rigidez Aproximada, o índice de confiabilidade é geralmente maior para a taxa de armadura de 4% que para a de 2%, já pelo Método da Curvatura Aproximada, o oposto pode acontecer.
- Quanto maior a excentricidade relativa de primeira ordem, menos confiável é o cálculo;
- Normalmente, quanto maior a esbeltez do pilar, menor é a sua confiabilidade
- Para concreto com resistência à compressão de 90 MPa, a confiabilidade tende a ser menor;
- O Método da Curvatura Aproximada resulta em um índice de confiabilidade maior que o Método da Rigidez Aproximada.

A avaliação da confiabilidade dos pilares através da simulação de Monte Carlo mostrou que as diretrizes da NBR-6118:2014 estão de acordo com a segurança, já que os índices de confiabilidade apresentaram valores satisfatórios para diferentes situações de projeto. É importante essa análise principalmente para os casos onde a resistência à compressão do concreto é maior que 50 MPa, que são casos não abordados na norma anterior.

REFERÊNCIAS

Araújo, J. M. Probabilistic analysis of reinforced concrete columns. In: *Advances in Engineering Software*, Vol. 32, No. 12, p. 871-879, 2001.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto*. Rio de Janeiro, 2013.

Diniz, S. M. Reliability bases for high-strength concrete columns. In: *Journal of Structural Engineering*, 123, p. 1375 – 1381, 1997.

Galambos, T. V.; Ellingwood, B.; MacGregor, J. G.; Cornell, A. *Probability Based Load Criteria: Assessment of Current Design Practice*. Journal of Structural Engineering. v.108, p.959-977, May, 1982.

Low, B. K.; Tang, W. H. *Efficient Spreadsheet Algorithm for First-Order Reliability Method*. Journal of Engineering Mechanics. n.133, p.1378-1387, December, 2007.

Mirza, S. A.; Skrabek, B.W. *Statistical Analysis of Slender Composite Beam-Column Strength*. Journal of the Structural Division, v. 118, p. 1312-1332, May. 1992.

Nogueira, H. A. *Avaliação da Confiabilidade de Pilares Curtos em Concreto Armado Projetados Segundo a NBR 6118:2003 (Dissertação de Mestrado)*, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

Nowak, A. S.; Szerszen, M. M. Calibration of design code for buildings (ACI 318): Part 1 – Statistical models for resistance. In: *ACI Structural Journal*, Vol. 100, No. 3, p. 377 – 382, 2003.