

Avaliação simplificada do efeito de segunda ordem em pórticos de concreto armado

Palavras-Chave: Engenharia Civil, Análise Estrutural, Efeitos de Segunda Ordem

Autores/as:

Théo Massao Taniguchi [FECFAU]

Prof. Dr. Gustavo Henrique Siqueira [FECFAU]

INTRODUÇÃO:

A análise dos efeitos globais de segunda ordem em uma estrutura esbelta é de extrema importância para garantir a estabilidade e segurança do edifício. Assim, é imprescindível que à medida em que se aumente o número de edifícios esbeltos, ocorra concomitantemente o surgimento de novos métodos mais práticos e eficientes para determinar os efeitos globais de segunda ordem, ou que os antigos métodos sejam atualizados e aperfeiçoados. Atualmente na norma brasileira ABNT NBR 6118:2014 [1], o parâmetro γ_z , proposto por Franco e Vasconcelos [2], classifica as estruturas em termos da suscetibilidade a esses efeitos, além de representar uma estimativa do quanto os momentos fletores obtidos na análise de primeira ordem vão ser amplificados, de forma a satisfazer a previsão dos momentos de segunda ordem. Temos que, de acordo com a norma, para valores de $1,1 \leq \gamma_z \leq 1,3$, os métodos simplificados podem substituir uma completa análise de segunda ordem.

Nesse projeto, nos baseamos no método simplificado do parâmetro χ_t , proposto por Reis et al. [3], que utiliza o período natural de vibração das estruturas de concreto armado para determinação dos efeitos de segunda ordem. Este parâmetro, apesar de apresentar resultados precisos e próximos às análises completas, é limitado por certas condições do sistema estrutural impostas durante o seu desenvolvimento. Assim, um dos objetivos desse projeto de iniciação científica foi aprimorar o parâmetro χ_t , de forma que ele abrangesse outras condições e características importantes do sistema. Sendo essas, por exemplo, a evolução das propriedades do concreto ao longo do tempo, como fluência, retração, entre outros; e as condições essenciais do sistema (momento não nulo na base e nulo na extremidade livre). Para isso, fizemos o uso de alguns resultados encontrados no trabalho de A. Wahrhaftig, K. Magalhães e G. Siqueira [4], no qual foi feito uma análise da perda de estabilidade estrutural de uma estrutura esbelta de concreto armado sujeita a uma força de compressão axial, em que se levou em consideração as condições e características que desejamos aprimorar para o parâmetro χ_t . Assim, foi possível desenvolver a expressão do parâmetro χ_t aprimorado, para se avaliar de forma simplificada os efeitos de segunda ordem em pórticos de concreto armado, submetidos a um carregamento lateral uniformemente distribuído.

METODOLOGIA:

Para esse projeto, analisamos o sistema de coordenadas generalizadas proposto por Reis et al. [3], da viga-coluna apresentada na figura 1. Temos que: “ $F(x) = F$ ”, é o carregamento horizontal uniformemente distribuído ao longo do comprimento da barra; “ $\bar{m}$ ”, é o peso próprio da barra por unidade de comprimento; a viga está engastada na base; “ $EI(x)$ ”, é a rigidez à flexão ao longo do comprimento da barra. Assume-se que a deformada do elemento pode ser dada por:

$$u(x,t) = \psi(x)z(t)$$

Onde “ $\psi(x)$ ” é a função de forma, independente do tempo, e “ $z(t)$ ” é a coordenada generalizada, independente de “ x ”. A função de forma assumida, deve pelo menos satisfazer as condições essenciais do problema para garantir-se resultados coerentes, observando-se que a utilização de uma função que satisfaça também as condições naturais do problema gera resultados mais precisos. Assim, assumiremos a função de forma “ $\psi(x)$ ” representada na equação 1, que também leva em consideração a evolução das propriedades do concreto ao longo do tempo, como fluência e retração:

$$\psi(x) = 1 - \cos\left(\frac{\pi x}{2H}\right) \quad (1)$$

Em seguida, partindo-se do princípio dos trabalhos virtuais, equação 2, foi possível obter a equação de movimento do sistema, equação 3. Esse princípio estabelece que um sistema está em equilíbrio se o trabalho virtual das forças externas for igual ao trabalho virtual das forças internas, quando submetido a um deslocamento virtual compatível com as condições de contorno. Assim, desenvolvendo essa igualdade chega-se à equação de movimento.

$$W_{ext} = W_{int} \quad (2)$$

$$\tilde{m} * \ddot{z}(t) + \tilde{k}s * z(t) + \tilde{k}g * z(t) = \tilde{p}(t) \quad (3)$$

- $\tilde{m}$ é a massa generalizada do sistema, $\tilde{m} = \int_0^H \overline{m(x)} (\psi(x))^2 dx$
- $\tilde{k}s$ é a rigidez elástica generalizada do sistema, $\tilde{k}s = \int_0^H EI(x) (\psi''(x))^2 dx$
- $\tilde{k}g$ é a rigidez geométrica generalizada do sistema, $\tilde{k}g = - \int_0^H N(x) (\psi'(x))^2 dx$
- $\tilde{p}(t)$ é o carregamento generalizado do sistema, $\tilde{p}(t) = g(t) \int_0^H f(x) \psi(x) dx$

A massa generalizada quando existe cargas concentradas atuando no elemento é dada por:

$$\tilde{m} = \int_0^H \overline{m(x)} (\psi(x))^2 dx + \sum_i m_i \psi_i^2 + \sum_i I_{oi} \psi_i'^2 \quad (4)$$

Dessa forma, a partir das equações dadas, calculamos as parcelas das equações de movimento. A massa generalizada é descrita na equação 5, e a rigidez elástica do sistema é expressa na equação 6.

$$\tilde{m} = \frac{P(1 - k_{pav})}{g} \frac{(3\pi - 8)}{2\pi} + \frac{k_{pav}P}{gn} \frac{1}{2} \left(3n - 2 \cot\left(\frac{\pi}{4n}\right) + 1 \right) \quad (5)$$

$$\tilde{k}s = EI \frac{\pi^4}{32H^3} \quad (6)$$

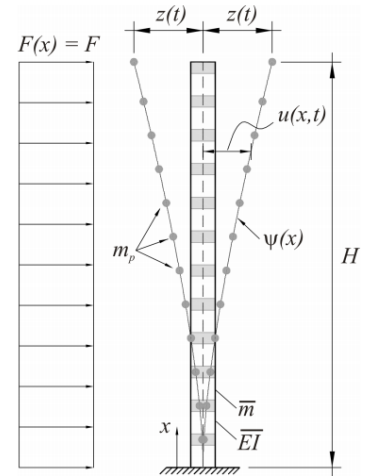


Figura 1. Viga-coluna equivalente, Reis et al. [3].

Vale ressaltar que, os diversos parâmetros de estabilidade global apresentados em normas de concreto armado não levam em consideração os efeitos desta rigidez geométrica, como uma instabilidade local. Assim, não foi considerado no equacionamento deste parâmetro o efeito da rigidez geométrica generalizada.

Em seguida, aplicamos o Método de Rayleigh, considerando que, para um sistema conservativo, existe uma igualdade entre a energia cinética máxima e a energia potencial máxima devido à conservação de energia:

$$vmáx = \kappa máx$$

$$\frac{1}{2} k u^2 = \frac{1}{2} m \omega^2 u^2$$

$$\omega^2 = \frac{k}{m}$$

Assim, como o coeficiente de rigidez “k” é dado pela soma dos coeficientes “ $\widetilde{k_g}$ ” e “ $\widetilde{k_s}$ ”, temos:

$$\omega^2 = \frac{\widetilde{k_g} + \widetilde{k_s}}{\widetilde{m}} \quad (7)$$

A partir dessa igualdade e dos valores anteriormente calculados, foi possível obter o equacionamento do parâmetro χ_t . Como proposto por Franco e Vasconcelos [2], a razão entre momentos fletores de segunda ordem e os de primeira ordem para o caso da barra engastada, é mostrada na equação 22. Tal razão deu origem ao parâmetro “ γ_z ” presente na norma brasileira ABNT:NBR 6118:2014 [1], que classifica a estrutura quanto a sua suscetibilidade a efeitos de segunda ordem, além de fornecer uma estimativa da amplificação dos esforços de primeira ordem decorrente dos efeitos globais de segunda ordem.

$$\frac{M_2}{M_1} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_2}{M_1}} \quad (8)$$

Onde, ΔM_2 é o momento provocado pelas forças verticais à estrutura deformada resultante de uma análise de primeira ordem. E M_1 é o momento de tombamento da estrutura provocado pelo carregamento horizontal distribuído. Logo, substituindo os valores calculados na equação 8, obtivemos a expressão do parâmetro, que em seguida foi simplificada, resultando na equação 9:

$$\chi_t = \frac{1}{1 - \frac{2,1149267 * T^2 * g * (36n^4 + 45n^3)}{27,81504 * H * \left(\frac{n^3}{2} + \frac{n^2}{2}\right) * \left(904 * n * k_{pav} - 710 * \cot\left(\frac{\pi}{4n}\right) * k_{pav} + 355 * k_{pav} + 161 * n\right)}} \quad (9)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Primeiramente, avaliou-se o comportamento da equação do parâmetro desenvolvido, para diferentes modelos de edifício, os quais foram retirados do trabalho de Reis et al. [3]. Em seguida, foi feita uma comparação do resultado obtido com os resultados observados para os parâmetros de Reis et al. [3] e Manone, Siqueira e Vieira Jr. [5]. Para isso, utilizou-se o software SciDavis para esboçar um gráfico, compondo as curvas de cada parâmetro, da razão “ M_2/M_1 ” em função do período natural de vibração “T”, nos diferentes modelos de edifício.



Figura 2. Planta baixa dos modelos analisados, [3].

Modelo	Direção	Número de Pavimentos	Altura total (m)	γ_z
1	X	16	48,0	1,300
	Y	16	48,0	1,300

Tabela 1. Dados dos modelos analisados.

Os resultados do modelo 1 para a direção “X” e para a direção “Y” foram os mesmos, figura 4, uma vez que o edifício possui uma planta baixa quadrangular. Nesse caso, é possível observar que os valores dos equacionamentos completo, equação 26, e simplificado, equação 27, são bastante próximos, apresentando uma divergência que se aproxima de 0%. Além disso, vemos que o comportamento das curvas do parâmetro desenvolvido nesse projeto se assemelha ao observado para as curvas dos parâmetros desenvolvidos por Reis et al. [3] e, Siqueira e Vieira Jr. [5].

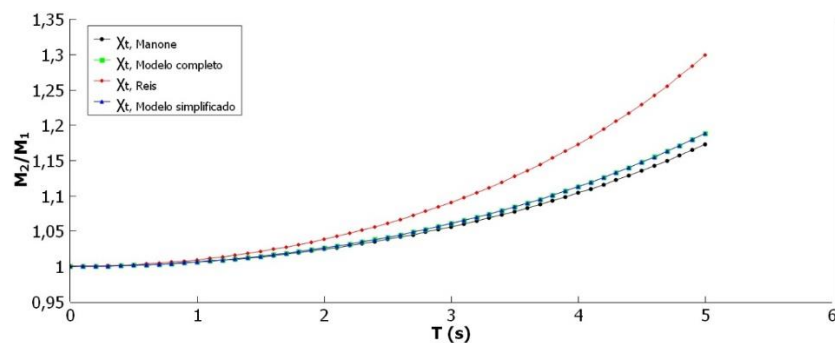


Figura 3. Amplificações M_2/M_1 em função do período natural T , modelo 1, direção “X”.

Uma vez desenvolvido o parâmetro χ_t , e verificado a sua conformidade com os resultados previstos, a próxima etapa desse projeto foi realizada por meio do software SAP2000 para a análise dos modelos de edifício, por meio do método dos elementos finitos. Dessa forma, por meio dele determinamos a nuvem de pontos relativos a “ M_2/M_1 ” nos pilares mais solicitados da estrutura, e em seguida plotamos as equações dos parâmetros χ_t dentro dessa nuvem, a fim de verificar se estamos em uma margem segura para a determinação dos carregamentos. Dessa forma, fizemos essa análise para diferentes modelos de edifício de concreto armado, sendo o resultado de um dos modelos mostrado no gráfico abaixo, figura 4.

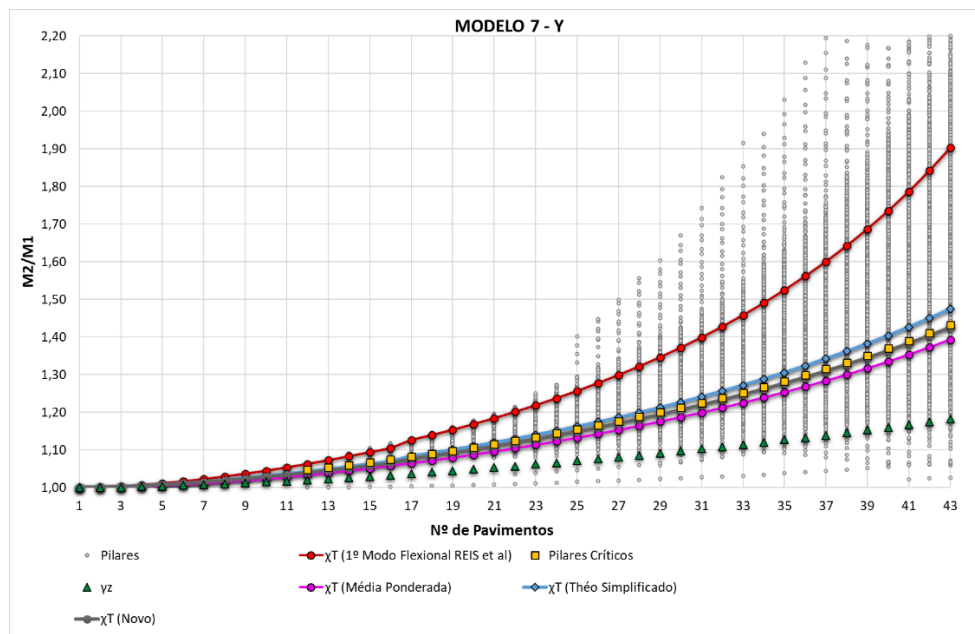


Figura 4. Curva M_2/M_1 x N° de pavimentos. Comparação entre os parâmetros e os pilares críticos.

Portanto, observa-se que a curva de amplificação dos esforços de segunda ordem (M_2/M_1) formada pelo parâmetro desenvolvido nesse projeto apresentou valores bem próximos ou maiores que à curva formada pelos pilares críticos. Esse resultado indica que a representação do comportamento dos pórticos de concreto armado, feita pelo parâmetro, é coerente e está a favor da segurança, uma vez que não apresenta valores abaixo dos pilares críticos. Além disso, comparamos a curva desse parâmetro com a curva dos parâmetros desenvolvidos em outros trabalhos [3, 5, 6], e apesar de todas se apresentarem próximas à curva dos pilares críticos, somente a curva desenvolvida nesse projeto mostrou valores acima dos pilares críticos. Ademais, vale ressaltar que o parâmetro " γ_z " presente na norma brasileira ABNT:NBR 6118:2014 [1], não foi capaz de fornecer uma análise coerente dos momentos de segunda ordem, apresentando valores bastante abaixo dos pilares críticos. Logo, poderia levar à problemas no dimensionamento da estrutura, uma vez que se estaria subestimando os esforços de segunda ordem atuantes na estrutura.

CONCLUSÕES:

Portanto, concluímos que a análise simplificada dos efeitos de segunda ordem em pórticos de concreto armado ainda possui um grande espaço para desenvolvimento de novos métodos e aperfeiçoamento dos métodos existentes publicados em artigos e na norma brasileira de concreto armado ABNT:NBR 6118:2014 [1]. Assim, o objetivo desse projeto foi desenvolver um novo parâmetro que levasse em consideração algumas propriedades importantes do concreto como fluência e retração, além de respeitar as condições essenciais do sistema, de forma a se obter um resultado mais próximo do real comportamento estrutural dos edifícios. Logo, a partir dos resultados obtidos vemos que o parâmetro desenvolvido por nós é capaz de prever tais efeitos de segunda ordem com uma proximidade e com uma margem de segurança em relação aos pilares críticos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.
- [2] Franco, M.; Vasconcelos, A. C. **Practical assessment of second order effects in tall buildings**. Colóquio on the CEB-FIP MC90, Rio de Janeiro. Proceedings, p. 307-323, 1991.
- [3] Reis, D. G.; Siqueira, G. H.; Vieira Jr., L. C. M.; Ziemian, R. D. **Simplified Approach Based on the Natural Period of Vibration for Considering Second-Order Effects on Reinforced Concrete Frames**. Int. J. Str. Stab. Dyn., Vol.18(5), 2018.
- [4] Wahrhaftig, A. M.; Magalhães, K. M. M.; Siqueira, G. H. **Evaluation of limit state of stress and strain of free-fixed columns with variable geometry according to criteria from the Brazilian code for concrete structures**. Lat. Am. j. solids struct., Vol.17(1), Rio de Janeiro, 2020.
- [5] Mamone, R. G.; Siqueira, G. H.; Vieira Jr., L. C. M. **The Use of Natural Period of Vibration as a Simplified Indicator of Second-Order Effects for RC Frames**. International Journal of Structural and Civil Engineering Research (Aceito para publicação).
- [6] Leitão, F. F.; Siqueira, G. H.; Vieira Jr., L. C. M.; Almeida, S. J. C. **Analysis of the global second-order effects on irregular reinforced concrete structures using the natural period of vibration**. Rev. IBRACON Estrut. Mater., Vol.12(2), São Paulo, 2019.
- [7] Paultre, P. **Dynamics of Structures**. Wiley-ISTE, New York, 2010.