



Tema: Estruturas de Aço e Mistas de Aço e Concreto

O USO DAS PROPRIEDADES DE VIBRAÇÃO (PERÍODO NATURAL) PARA AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE SEGUNDA ORDEM EM ESTRUTURAS DE AÇO

Ricardo Ficanha¹
Zacarias Martin Chamberlain Pravia²

Resumo

Com o aumento significativo da utilização de aço como sistema estrutural em empreendimentos em todo o mundo, as necessidades de atualização em normas e procedimentos de análise que influenciam no correto comportamento são recorrentes. Essas atualizações levam em conta todos os recursos de estabilidade e resistência dos elementos e sistemas utilizados para viabilizar o projeto com a devida segurança, fundamental para vida útil da estrutura. Nas últimas décadas as normas específicas incluíram nas prescrições, obrigatoriedade na verificação dos efeitos de segunda ordem nas estruturas. Foi avaliada a resposta da estrutura a efeitos de segunda ordem com a utilização da resposta da análise modal da estrutura com o período referente para cada caso de carregamento apresentado. Os resultados gerados apresentam coerência com o método que classifica a estrutura através do método comparativo entre deslocamentos provenientes de análise de segunda e primeira ordem, utilizado pelas normas de estruturas de aço em vigor.

Palavras-chave: Período natural; Análise de segunda ordem; Sensibilidade estrutura;

USE VIBRATION PROPERTIES (MODAL ANALYSIS) TO EVALUATION SECOND ORDER EFFECTS IN STEEL STRUCTURES

Abstract

With the significant increase in the use of steel as a structural system in enterprises worldwide, the need to update codes and guides for analysis ultimately influence the correct behavior of the steel structure to allow use all features of stability and resistance of elements and systems used to make the project viable. In recent decades the specific rules included in prescriptions, mandatory verification of second order effects in structures. The response of the structure to second order effects with the use of modal analysis of the response of the structure with the related period for each loading case presented was evaluated. The generated results show consistency when compared with the second order drifts and primer order drifts used by the standards of steel structures.

Keywords: Natural period; Second order analysis; Steel structure Sensibility;

¹ Engenheiro Mecânico, Acadêmico PPGeng da FEAR/UPF, Engenheiro METASA S.A., Marau - RS, Brasil.

² D. Sc., Professor titular PPGEng FEAR/UPF, Passo Fundo - RS, Brasil.



1 INTRODUÇÃO

O uso de estruturas de aço em edificações industriais ocorre devido aos vários motivos específicos relacionados e avaliados no momento da escolha do sistema estrutural para o empreendimento. A fase de análise estrutural requer elevado conhecimento do engenheiro responsável, o qual, entre outras verificações, deve ter total atenção para os esforços gerados pelo comportamento de segunda ordem da estrutura quando em operação.

O desenvolvimento tecnológico permite ao engenheiro a pesquisa detalhada das respostas do comportamento da estrutura. O comportamento da estrutura para carregamentos verticais, no que tange análise da sensibilidade da estrutura para deslocamentos horizontais, conhecidos como efeitos de segunda ordem, foram apresentando metodologias de avaliação alternativas e renovadas.

A análise aos efeitos de segunda ordem, nas últimas décadas, foi incluso em diversas normas como requisitos primários para a avaliação da estrutura. A norma brasileira ABNT NBR8800:2008, mesmo contendo informações sobre análise de segunda ordem em versão anterior, no ano de 2008 prioriza e destaca o procedimento de cálculo de estruturas de aço em duas etapas. Determinação dos esforços e a verificação do dimensionamento da seção de perfil pré-definida na análise. Na etapa de análise, a referida norma, orienta a definição dos esforços de acordo com a classificação da estrutura quanto a deslocabilidade, levando-se em consideração as imperfeições geométricas na análise não linear, apresentado por Lavall et al. [1].

A determinação de deslocamentos, velocidades e acelerações dos elementos que fazem parte de um sistema estrutural submetido a cargas dinâmicas pode ser definida pela dinâmica das estruturas [2]. As respostas da estrutura para as grandezas citadas são sempre definidas com base na deformada estática da estrutura. Os modos de vibração da estrutura possibilitam a interpretação dos resultados de forma gráfica, deve-se selecionar os modos de vibração que fornecem os resultados que estão sendo verificados, no caso de confirmação da frequência de pisos, o mais importante são os modos que apresentam deslocamento (vibração) vertical. No caso de um edifício de vários níveis, geralmente, cada nível apresenta um modo de flambagem, ficando a cargo do engenheiro selecionar o modo que represente o estado que se está verificando.

Estudos envolvendo o período natural da estrutura, principalmente para estudos considerando o uso e ocupação de edificações com grande concentrações de pessoas e os respectivos uso, sala de ginástica, anfiteatro, ou qualquer outra ocupação, são destaques no meio técnico, assunto que até então não era tido com a atenção que necessita, simplificando alguns métodos e meios para definir o comportamento da estrutura quando submetida a excitações dinâmicas devido a uso e ocupação.

Diversos trabalhos recentes são encontrados na literatura referentes a análises de frequência natural de estruturas de aço e estruturas mista de aço e concreto. Todavia, estes trabalhos apresentam, geralmente, estudos vinculados ao comportamento da estrutura quando submetidas a excitações devida ao uso e ocupação de população, para atividades como ginástica, caminhada, salões de festas entre outros ambientes passíveis de se desenvolver vibrações devido ao uso da população [3, 4, 5].

Estudos relacionados com análise modal, determinações aproximadas de período, apresentação de códigos internacionais para definição de períodos naturais e ensaios, todavia,



estes trabalhos não relatam a relação com os efeitos de segunda ordem. Chrysanthakopoulos et al. [6], apresenta formulação para determinação aproximada dos períodos naturais de estruturas aperticadas e contraventadas. Nicoreac e Hoenderkamp [7] apresenta um resumo das considerações para períodos naturais para edificações com sistemas estabilizantes verticais. Valle et al. [8] apresenta estudo realizado com estrutura apresentando o comportamento não linear da estrutura em análise ao período da estrutura, sem vincular equacionamentos para avaliação dos efeitos no cálculo.

A busca da frequência natural da estrutura é atividade necessária e crescente devido à grande utilização de estruturas de aço para suportes de equipamentos. Para facilitar a aplicação em modelos reais e utilização de softwares comerciais, diversos estudos são encontrados com os resultados para estruturas cuja análise modal é realizada no software SAP2000. Assunção e Paula [9] apresentam de forma prática a análise de um estrutura suporte para uma peneira vibratória as considerações que se deve e que não se deve fazer para aproximar os resultados do modelo de cálculo com valores reais obtidos com medição da estrutura.

Statler et al. [10], apresenta um estudo realizado em 9 (nove) modelos planos de edifícios regulares indicando o período natural da estrutura predizendo assim os efeitos de segunda ordem, característicos por incrementar esforços internos de momento fletor nos elementos que resistem a esforços gravitacionais e são responsáveis pela estabilização da edificação.

O período natural de uma estrutura, utilizado na maioria das vezes para d

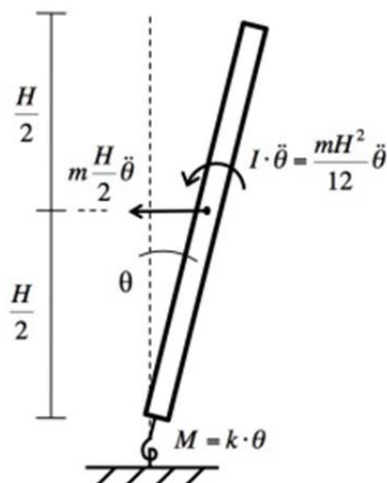


Figura 1 – Sistema com um grau de liberdade
Fonte: Adaptado de Statler et al. [10]

A estrutura apresentada na Figura 1 pode ser modelada conforme a Equação 1, equação que apresenta a equação do movimento da estrutura simplificada.

$$\frac{mH^3}{3} \ddot{\theta} + k\theta = 0 \quad (1)$$



O período fundamental em função da massa da estrutura pode ser expressa pela Equação 2, já considerado a rigidez da estrutura para um elemento fixo e livre.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{mH^2}{3k}} \quad (2)$$

A consideração dos fatores de amplificação devido aos efeitos de segunda ordem, a expressão que define o período da estrutura necessita levar em consideração o fator que define a sensibilidade da estrutura para resistir a efeitos de segunda ordem, acrescentado na Equação 2 e apresentado na Equação 3 o fator B_2 , considerando assim os efeitos de segunda ordem na análise do período da estrutura.

$$T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{B_2 m H^2}{3k}} \quad (3)$$

Sabendo-se que pelo método aproximado de amplificação dos efeitos de segunda ordem aproximado e exato, podem ser representados pelas equações 4 e 5, respectivamente, pode-se isolar os fatores de amplificação em função do período da estrutura, pois apresentam as mesmas variáveis envolvidas. Os fatores de amplificação dos momentos em função do período natural da estrutura, para o método aproximado e para o método exato, são apresentados nas Equações 6 e 7, respectivamente, sendo L a altura total do elemento.

$$B_a = 1 + \frac{P}{kL} \quad (4)$$

$$B_e = \frac{1}{1 - \frac{P}{kL}} \quad (5)$$

$$B_{a,t} = 1 + \frac{3T^2 g}{4\pi^2 L} \quad (6)$$

$$B_{e,t} = \frac{1}{1 - \frac{3T^2 g}{4\pi^2 L}} \quad (7)$$

O objetivo do trabalho foi apresentar a avaliação da sensibilidade de um modelo tridimensional de um edifício industrial em aço para efeitos de segunda ordem, realizado com a análise modal que define o período natural da estrutura e comparar com a avaliação dos efeitos de segunda ordem pela avaliação dos deslocamentos de análise linear de primeira ordem e linear de segunda ordem.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Um modelo de um edifício estrutural com análise realizada no software SAP2000 [13] com as ações devido uso e ocupação será apresentado, priorizando a comparação entre os efeitos de segunda ordem com inclusão no modelo de cargas fictícias e análise do período natural da estrutura. O edifício tem fins industriais e devido a finalidade não apresenta sistema de contraventamento vertical formado por elementos inclinados, apenas pórticos rígidos e vigas para apoios de grades de piso e equipamentos.

O edifício industrial é composto por 12 níveis, sendo o edifício principal composto por 9 colunas (dispostas de 3 em 3), e uma torre de escadas anexa ao edifício principal, possibilitando o acesso a todos os níveis. Os elementos inclinados das escadas não foram considerados no modelo, tampouco as ações desenvolvidas por estes elementos inclinados, pois apresentam baixa rigidez e não necessária para avaliação da estabilidade.

Os níveis são 2.500 mm, 5.000 mm, 7.000 mm, 9.000 mm, 11.400 mm, 13.800 mm, 15.950 mm, 18.100 mm, 21.150 mm, 24.200 mm, 27.250 mm e 30.300 mm, conforme esquema da Figura 2 é possível ver a distribuição dos níveis e a regularidade do sistema. A carga permanente (CP) de 0,3 kN/m² e carga acidental (SC) de 4,0 kN e atribuída para todos os níveis exceto o nível 5.000 mm que apresenta uma carga permanente de 0,6 kN/m² e carga acidental de 15,0 kN/m².

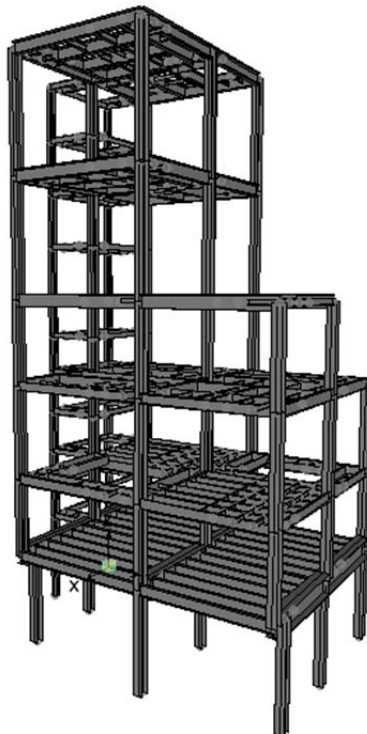


Figura 2 - Perspectiva do modelo em estudo

A combinação de ações utilizadas para comparação dos efeitos de segunda ordem com as cargas fictícias e o período natural da estrutura é 1,2 CP + 1,6 SC. Sendo que as ações dos



equipamentos na estrutura podem ser visualizadas na Figura 3, com as respectivas cargas em cada nível de apoio dos equipamentos. Os equipamentos não serão apresentados pois não são o objetivos deste trabalho e sim, apenas as ações destes sobre a estrutura para análise das respostas do sistema.

Para análise modal da estrutura foram consideradas as cargas permanentes e para verificação da influência da inclusão da solicitação variável devido aos equipamentos, serão apresentados 6 (seis) respostas para consideração de 10 a 60% de ação variável juntamente com as ações permanentes consideradas na estrutura. Não foram consideradas imperfeições geométricas e redução do modulo de elasticidade para obtenção do período da estrutura. Sendo a carga considerada como variável apresentada na Figura 3.

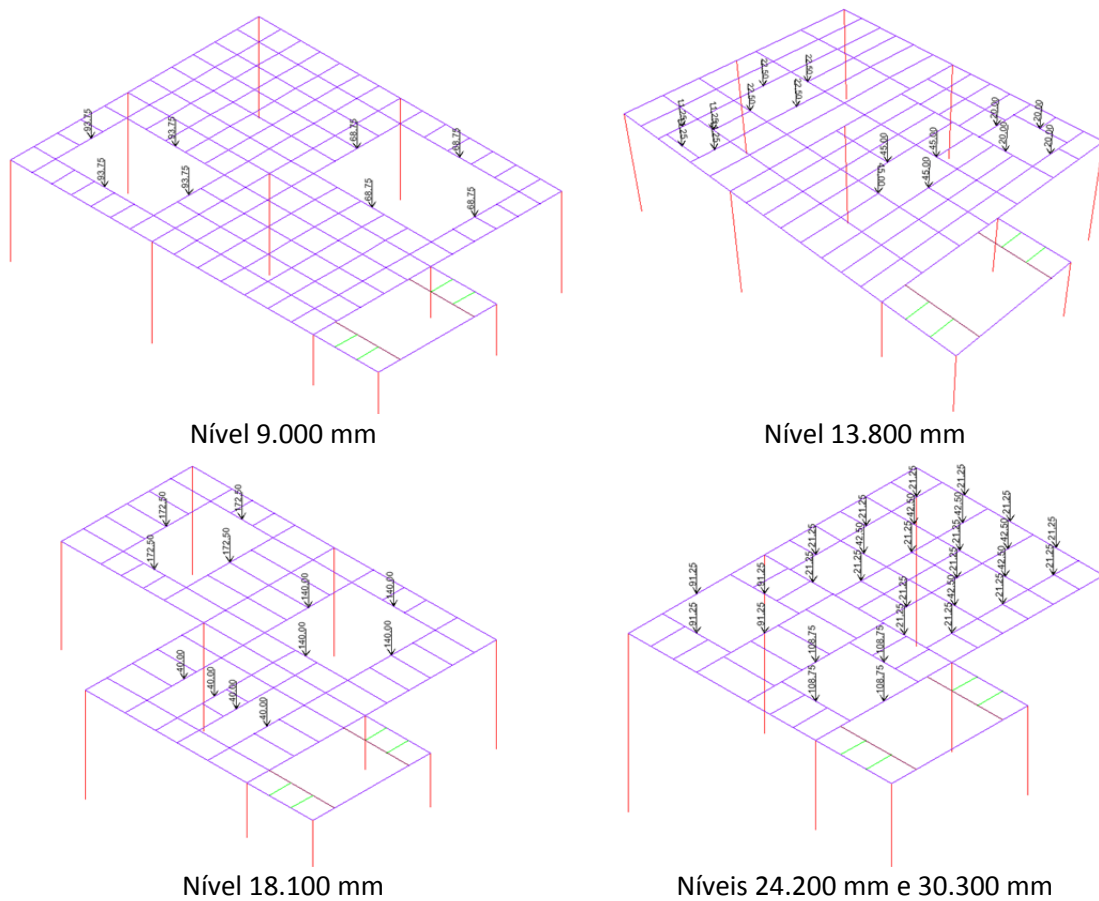


Figura 3 - Ações verticais dos equipamentos sobre a estrutura em cada nível

A análise de segunda ordem realizada pela inclusão de cargas nocionais nas colunas é realizada com a consideração de *notional loads* com valor correspondente a 0,2% da respectiva solicitação definida pela área de influência de cada coluna, as cargas fictícias foram consideradas nos dois eixos ortogonais da estrutura para se detectar qual é o sentido mais sensível da estrutura para comportamento não linear devido a carregamentos verticais. A carga fictícia é determinada conforme as prescrições na norma americana AISC 360 [11]. A Figura 4 ilustra a consideração em todas as colunas da estrutura das cargas fictícias consideradas.

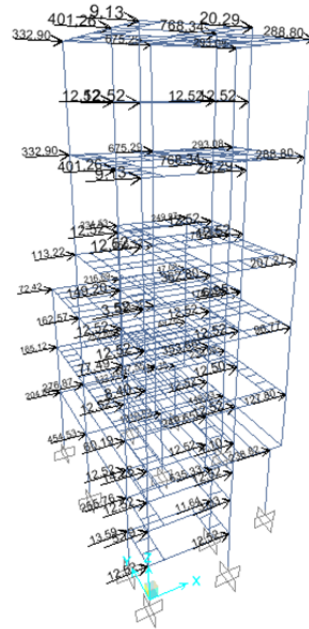


Figura 4 – aplicação das cargas fictícias no modelo tridimensional

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da segunda ordem com a consideração de cargas fictícias horizontais para representar as imperfeições geométricas da estrutura são apresentados para a coluna destacada na Figura 5, com resultados para todos os níveis, nas duas direções ortogonais (x e y) e em ambos os sentidos (positivo e negativo).

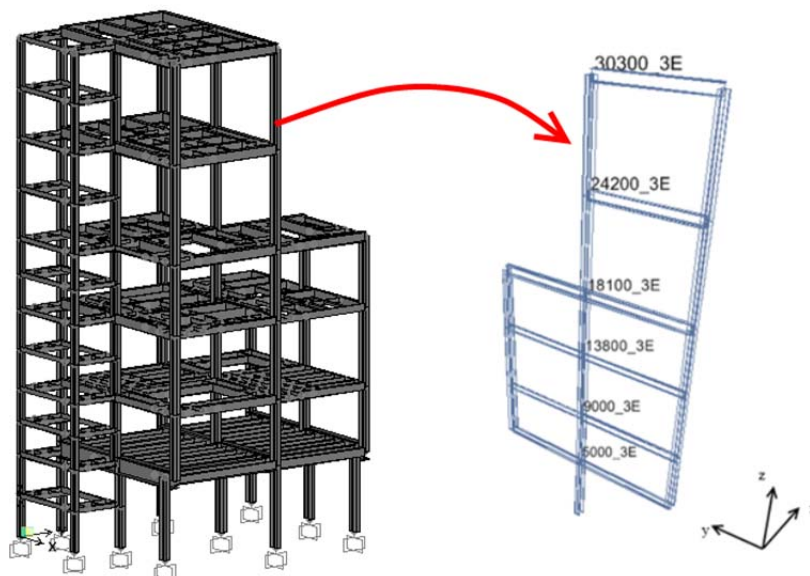


Figura 5 - Coluna em análise da sensibilidade a deslocamentos horizontais



A Tabela 1 apresenta os resultados para a avaliação dos efeitos de segunda ordem com *notional load* de 0,2 % na direção x, com módulo de elasticidade de 200GPa em todos os níveis da coluna em estudo.

Tabela 1 - Análise segunda ordem na direção x, *notional load* = 0,002Fg

Nó	Δx (+) Coluna 3E			Δx (-) Coluna 3E		
	Δ_{x2}	Δ_{x1}	Δ_{x2}/Δ_{x1}	Δ_{x2}	Δ_{x1}	Δ_{x2}/Δ_{x1}
5.000_3E	0,49	0,48	1,03	-0,24	-0,23	1,04
9.000_3E	1,31	1,23	1,06	-0,33	-0,32	1,01
13.800_3E	3,34	3,12	1,07	0,14	0,11	1,25
18.100_3E	5,57	5,18	1,08	0,96	0,87	1,10
24.200_3E	8,79	8,20	1,07	2,52	2,35	1,07
30.300_3E	10,96	10,31	1,06	4,13	3,92	1,05

O valor apresentado para relação entre o deslocamento de segunda ordem e o deslocamento de primeira ordem para o nível 13.800 mm na Tabela 1 no sentido negativo de x, demonstra uma amplificação considerável na estrutura de aproximadamente 1,25, todavia verifica-se que ocorre uma inversão no sentido dos deslocamentos, mostrado através do sinal dos deslocamentos. Sendo a coluna neste nível pouco solicitada devido à composição dos esforços do modelo, não caracterizando uma grande sensibilidade da estrutura a deslocamentos horizontais de segunda ordem.

A Tabela 2 apresenta os resultados para a avaliação dos efeitos de segunda ordem com *notional load* de 0,2 % na direção y, com módulo de elasticidade de 200GPa em todos os níveis da coluna em estudo.

Tabela 2 - Análise segunda ordem na direção y, *notional load* = 0,002Fg

Nó	Δy (+) Coluna 3E			Δy (-) Coluna 3E		
	Δ_{y2}	Δ_{y1}	Δ_{y2}/Δ_{y1}	Δ_{y2}	Δ_{y1}	Δ_{y2}/Δ_{y1}
5.000_3E	2,38	2,09	1,14	-0,30	-0,22	1,33
9.000_3E	3,84	3,39	1,13	-0,53	-0,43	1,21
13.800_3E	6,02	5,33	1,13	-0,78	-0,66	1,19
18.100_3E	6,44	5,66	1,14	-1,71	-1,55	1,10
24.200_3E	12,18	11,08	1,10	2,48	2,42	1,02
30.300_3E	14,88	13,66	1,09	4,33	4,19	1,03

Os resultados para a consideração das cargas fictícias na direção y apresentam relações maiores entre os deslocamentos de segunda e primeira ordem. Caracterizando maior sensibilidade da estrutura na direção em que as *notional loads* são aplicadas no sentido perpendicular a menor inércia da seção das colunas.

O período natural do modelo de cálculo para consideração de 10 % à 60 % da ação gravitacional é apresentado na Figura 6, com o respectivo modo de vibração da estrutura. Observa-se que o primeiro modo para os casos de consideração de 10 % à 30 % da ação



variável apresenta modo comportamento similar ao primeiro modo para consideração de 50 % e 60% da carga acidental, o único modo distinto é para a combinação de carga com 40 % das ações acidentais, todavia, todos os casos de ações ilustradas não apresentam uma variação no valor considerável do período natural da estrutura.

Utilizando as Equações 6 e 7 para definição dos fatores de amplificação dos esforços pelo método aproximado e pelo método exato, respectivamente, são apresentados os resultados para cada período representando a porcentagem de ação variável considerada na análise.

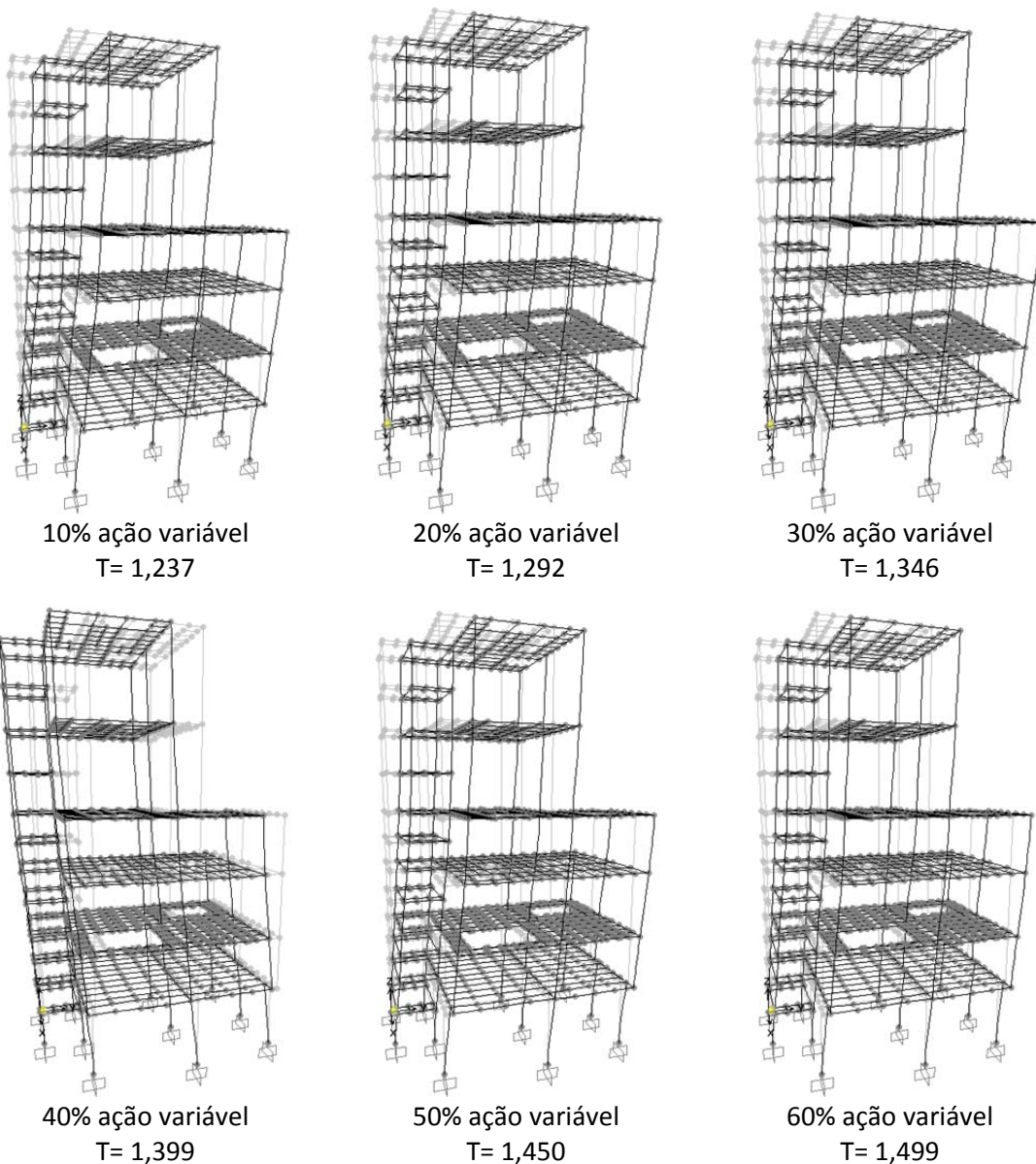


Figura 6 - Primeiro modo do período natural para ação variável com considerações de 10 a 60% do seu valor pleno



A Tabela 3 apresenta os resultados para os métodos de avaliação dos efeitos de segunda ordem na estrutura com amplificação dos esforços aproximado e exato.

Tabela 3 – Análise da amplificação dos esforços considerando o período da estrutura

% AV	T (s)	L (m)	g (m/s ²)	B _{a,t}	B _{e,t}
10%	1,237	30,3	9,81	1,113	1,127
20%	1,292	30,3	9,81	1,123	1,141
30%	1,346	30,3	9,81	1,134	1,154
40%	1,399	30,3	9,81	1,144	1,169
50%	1,45	30,3	9,81	1,155	1,184
60%	1,499	30,3	9,81	1,166	1,199

Os resultados das amplificações são mínimas, o que representa que a estrutura não apresenta sensibilidade a efeitos de segunda ordem devido a carregamento vertical.

É percebida pequena variação entre o método aproximado e o método exato de cálculo para obtenção dos fatores de amplificação dos esforços para consideração dos efeitos de segunda ordem na estrutura. Porém, apresenta valores que possibilitam a avaliação da estrutura como uma estrutura que apresenta sensibilidade para efeitos de segunda ordem frente a carregamentos gravitacionais.

4 CONCLUSÃO

O estudo levou em consideração a aplicação de um método simplificado considerando o período da estrutura e a influência da carga gravitacional para os resultados do período natural da estrutura, representando o comportamento da estrutura de forma semelhante ao resultado da análise dos deslocamentos da estrutura considerando as cargas fictícias aplicadas horizontalmente nos nós das colunas.

O método de cálculo apresentado para avaliação da sensibilidade da estrutura para efeitos de segunda ordem representa uma maneira rápida de verificação do estado da estrutura referente à sensibilidade a desenvolver efeito de segunda ordem significativo para os esforços internos, visto a facilidade atual de realização de análise modal e definição dos períodos da estrutura.

Um estudo sobre as simplificações adotadas de regularidade nas cargas e centro de gravidade da estrutura devem ser aprofundado, gerando maior confiabilidade e até mesmo possibilidade de inclusão em normas técnicas de estruturas de aço.

REFERÊNCIAS

- 1 Lavall, A. C. C.; Silva, R. G. L. da; Costa, R. S.; Fakury, R. H. Análise avançada de pórticos de aço conforme as prescrições da ABNT NBR 8800:2008. Revista da Estrutura de Aço. 2013; v.2, n3: 146-165.
- 2 Lima, S. S.; Santos, S.H.; Análise dinâmica das estruturas. Rio de Janeiro. Editora Ciência Moderna, 2008.



- 3 Lee, S-H.; Lee, K-K.; Woo, S-S.; Cho, S-H. Global vertical mode vibration due to human group rhythmic movement in a 39 story building structure. *Engineering Structures*. 2013; v.57: 296-305.
- 4 Lee, K.; Lee, S-H.; Kim, G-C.; Woo, S-S. Global vertical resonance phenomenon steel building and human rhythmic excitations. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014; v.92: 164-174.
- 5 Neves, C. L. F.; Silva, J. G. S. da; Lima, L.R.O. de; Jordão, S. Multi-story, multi-bay buildings with composite steel-deck floors under human-induced loads: The human comport issue. *Computers and Structures*. 2014; v.136: 34-46.
- 6 Chrysanthakopoulos, C.; Bazeos, N.; Beskos, D. E. Approximate formulae for natural periods of plane steel frames. *Journal of Constructional Steel Research*. 2006; v.62: 592-604.
- 7 Nicoreac, M. e Hoenderkamp, J. C. D. Periods of vibration of braced frames with outriggers. *Procedia Engineering*. 2012; v.40: 298-303.
- 8 Valle, Z. J. L.; Diéguez, G. M.; Camblor, A. R. Nonlinear modal identification of a steel frame. *Engineering Structures*. 2013; v.56: 246-259.
- 9 Assunção, T.M.R.C.; Paula, F. A. de; *Análise dos Efeitos Dinâmicos Induzidos por Peneiras Vibratórias em Estruturas Industriais*. São João Del-Rei. Associação Brasileira de Métodos Computacionais em Engenharia, 2010.
- 10 Statler, D. E.; Ziemian, R. D.; Robertson, L. E. The natural period as an indicator of second-order effects. *Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council*. 2011;
- 11 American Institute of Steel Construction – AISC360. Load and resistance factor design specification for structural steel buildings. Chicago, 2010. p.612.
- 13 SAP 2000 – Software integrado para análise e dimensionamento estrutural. *Computers and Structures, Inc. California*. V16, 2014.