

Fábio A. Nardi¹
 Ricardo Ficanha²
 Zacarias M. Chamberlain Pravia³

¹ Eng. Mecânico
 Setor de Engenharia METASA S/A – fansc85@gmail.com
² Acadêmico de Eng. Mecânica
 Setor de Engenharia METASA S/A – ficanha.ricardo@gmail.com
³ D.Sc., Professor Titular FEAR/UPF – zacarias@upf.br

Análise de Segunda Ordem: Aplicações, Dificuldades e Recomendações

Introdução

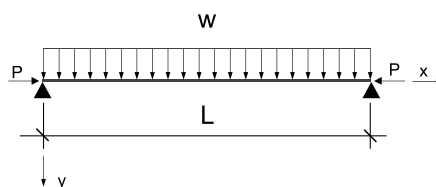
As normas mais modernas para dimensionamento de estrutura de aço, dentre elas ABNT NBR 8800:2008 e AISC 360 prevista para 2010, prescrevem a avaliação da deslocabilidade horizontal de edificações, através da análise de segunda ordem.

A análise de primeira ordem pressupõe para o cálculo de esforços e deslocamentos o equilíbrio da estrutura em sua posição inicial indeformada. Ao contrário da análise de segunda ordem, estabelece o equilíbrio da estrutura na posição deformada, gerando esforços adicionais devido as forças aplicadas sobre os deslocamentos.

Este trabalho foi desenvolvido com exemplos e aplicações de análise de 2ª ordem em edifícios tridimensionais, demonstrando que este efeito é apenas perceptível em estruturas com certa esbeltez e somente aplicável a estruturas principais, pois os modelos de análises contendo estruturas secundárias e terciárias não convergem devido a alta deslocabilidade.

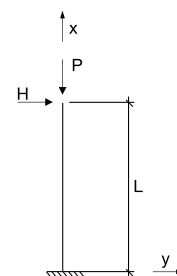
É importante avaliar a qualidade do programa computacional que está sendo usado para o cálculo das estruturas de aço, para isso nos comentários do

AISC 360:05 (vide os comentários nas páginas 16.1-435, Figura C-A-7.2 Benchmark problems) existem formulações exatas do comportamento de deslocamento lateral e de deslocamento por não linearidade da barra. Aqui esses modelos de referência são apresentados na Figura 01.



$$M_{MAX} = \frac{wL^2}{8} \left[\frac{2(\sec u - 1)}{u^2} \right] \text{ Onde } u = \sqrt{\frac{PL^2}{4EI}}, M_0 = \frac{wL^2}{8} \quad (1)$$

$$y_{MAX} = \frac{5wL^4}{384EI} \left[\frac{12(2\sec u - u^2 - 2)}{5u^4} \right] \text{ Onde } y_{MAX} = \frac{5wL^4}{384EI} \quad (2)$$



$$M_{MAX} = HL \left(\frac{\tan \alpha}{\alpha} \right) \text{ Onde } \alpha = \sqrt{\frac{PL^2}{EI}}, M_0 = HL \quad (3)$$

$$y_{MAX} = \frac{HL^3}{3EI} \left(\frac{3(\tan \alpha - \alpha)}{\alpha^3} \right) \text{ Onde } y_0 = \frac{HL^3}{3EI} \quad (4)$$

FIGURA 1: Formulações de referência para avaliação de programas que realizam análise de segunda ordem

A NBR 8800:2008 [3] orienta que as cargas horizontais sejam de 0,3% das cargas gravitacionais e a aplicação do efeito P-delta. Segundo LOPES (2005) [4], o efeito P-delta consiste em fazer inúmeras iterações atualizando sempre a matriz de rigidez em função da carga horizontal e do deslocamento. Quando não há mais deslocamento relativo dos nós da estrutura, a análise então converge e tem-se então o deslocamento total da estrutura. Se a análise não convergir, significa que a estrutura apresenta rigidez insuficiente.

Classificação quanto a deslocabilidade

Segundo a NBR 8800:2008 [3], os resultados da análise de estabilidade podem ser divididos em três campos:

- Baixa deslocabilidade quando $\frac{\Delta_{2^{\circ}ordem}}{\Delta_{1^{\circ}ordem}} \leq 1,1$
- Média deslocabilidade quando $1,1 \leq \frac{\Delta_{2^{\circ}ordem}}{\Delta_{1^{\circ}ordem}} \leq 1,4$
- Alta deslocabilidade quando $\frac{\Delta_{2^{\circ}ordem}}{\Delta_{1^{\circ}ordem}} \geq 1,4$

A análise de estabilidade é o parâmetro para a utilização da análise de segunda ordem como critério de dimensionamento, pois para estruturas que possuam média e alta deslocabilidade é recomendável que se faça a utilização deste artifício para se obter os esforços nos elementos e conseqüentemente o dimensionamento.

Análise de estabilidade coluna

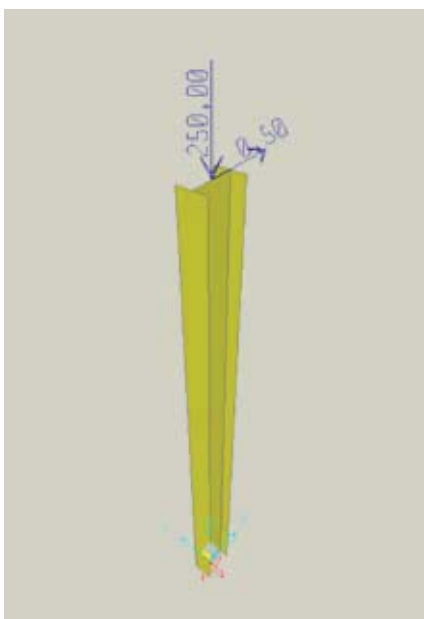


FIGURA 2: Modelo de análise de estabilidade para coluna

Perfil: W150X18

$$I = 939\text{cm}^4 \quad L = 200\text{cm} = 2000\text{mm} \quad H = 0,5\text{kN}$$

$$E = 20.000\text{kN/cm}^2 \quad P = 250\text{kN} \quad \text{Base : Engastada}$$

Deslocabilidade através da equação:

$$y_0 = \frac{HL^3}{3EI} \longrightarrow y_0 = \frac{0,5 \times 200^3}{3 \times 20.000 \times 939} \longrightarrow y_0 = 0,070997\text{cm} = 0,70997\text{mm}$$

$$y_{\max} = \frac{HL^3}{3EI} \left[\frac{3(\text{tg}\alpha - \alpha)}{\alpha^3} \right] \longrightarrow \alpha = \sqrt{\frac{PL^2}{EI}} \longrightarrow \alpha = \sqrt{\frac{250 \times 200^2}{20.000 \times 939}}$$

$$\alpha = 0,73$$

$$y_{\max} = \frac{0,5 \times 200^3}{3 \times 20000 \times 939} \left[\frac{3(\text{tg}0,73 - 0,73)}{0,73^3} \right] \longrightarrow y_0 = 0,090294\text{cm} = 0,90294\text{mm}$$

$$y_{\max}/y_0 = 0,70997/0,90294 \longrightarrow y_{\max}/y_0 = 1,27$$

A Tabela 1, mostra um comparativo entre os resultados oriundos da equação acima em relação aos softwares comerciais, e também a influência do número de elementos de uma barra no efeito P-delta da análise não linear de segunda ordem.

Nº Barras	Equação	Equação Pdelta	STRAP	STRAP Pdelta	SAP	SAP Pdelta
1	0,70997	0,90294	0,72013	0,87727	0,7394	0,9490
2	0,70997	0,90294	0,72029	0,90546	0,7394	0,9489
3	0,70997	0,90294	0,72023	0,9118	0,7394	0,9471
4	0,70997	0,90294	0,72025	0,91416	0,7394	0,9471
5	0,70997	0,90294	0,72026	0,91528	0,7394	0,9471

TABELA 1: Comparativo entre métodos e softwares

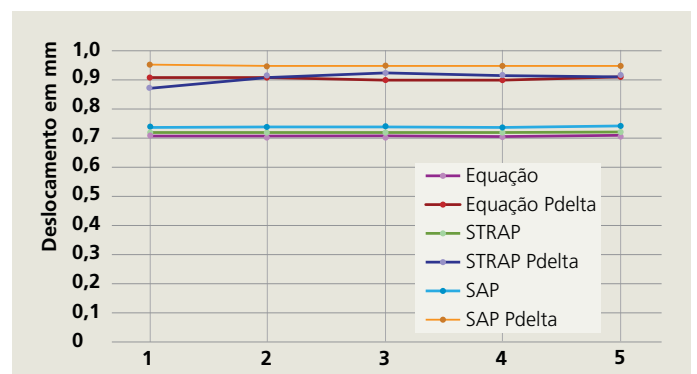


FIGURA 3: Comparativo entre métodos e softwares de análise linear e não linear elásticas

Modelo de edifício de múltiplos andares

O modelo da figura 4 tem o intuito de mostrar a influência que uma estrutura esbelta tem em uma análise de estabilidade e de segunda ordem. O referido modelo possui dois vãos de 15m no sentido longitudinal e um vão de 10m no sentido transversal do edifício. A altura dos seis andares é de 8m sendo que o ultimo patamar possui 12m de altura, totalizando sete plataformas. O software de análise utilizado foi o SAP 2000 vs.14.1.0

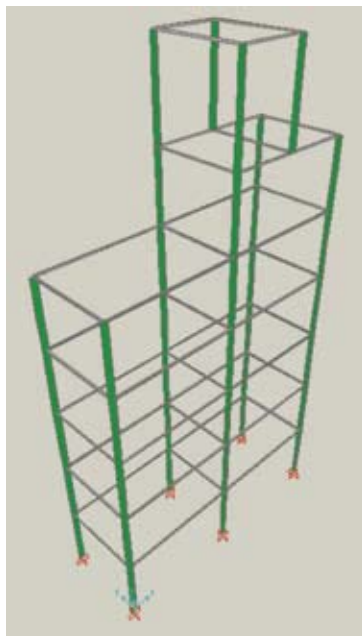


FIGURA 4: Vista Isométrica do modelo

O carregamento foi inserido apenas nas vigas de 15m, ou seja, nas vigas do sentido longitudinal do edifício em todos os andares com uma carga gravitacional distribuída de 0,2kN/mm. Os perfis das colunas são W610X174 laminados e vigas W200X22.5 laminados. O carregamento horizontal inserido foi de 0,3% da carga gravitacional do andar dividido pelo número de nós do andar da fachada de aplicação. As cargas gravitacionais podem ser visualizadas na figura 5.

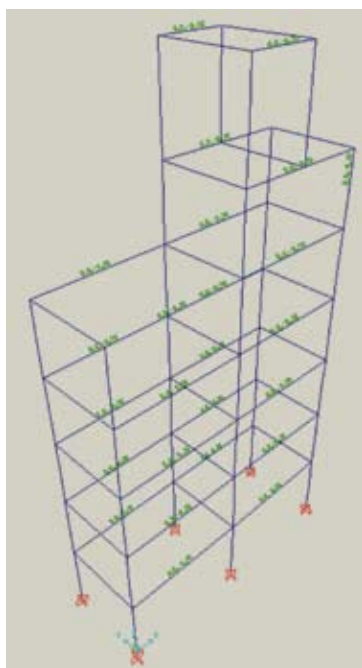


FIGURA 5: Cargas gravitacionais inseridas nas vigas longitudinais.

Além das cargas gravitacionais, foram inseridas nos nós cargas nocionais laterais que correspondem a 0,3% da carga gravitacional do andar.

Por andar temos:

$$H = 0,2 \frac{kN}{mm} \times 4 \times 15000mm \rightarrow H = 12000kN \rightarrow H = \frac{12000 \times 0,003}{3}$$

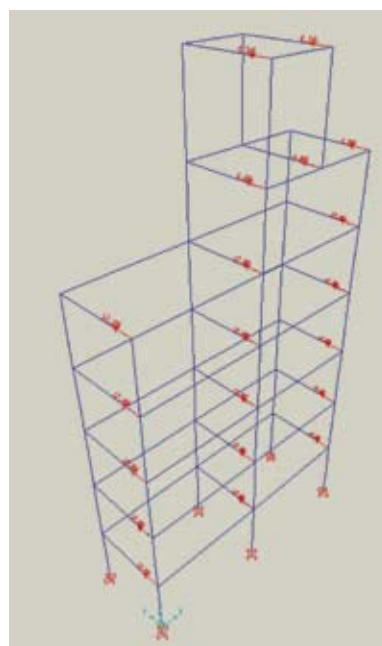
$$H = 12kN$$

Para os 5 primeiros andares, as cargas nocionais são de 12kN. Para o sexto andar, a carga horizontal é a seguinte:

$$H = 0,2 \frac{kN}{mm} \times 2 \times 15000mm \rightarrow H = \frac{6000 \times 0,003}{3} \rightarrow H = 6kN$$

Para o último andar, a carga nocional horizontal é obtida por:

$$H = 0,2 \frac{kN}{mm} \times 2 \times 7500mm \rightarrow H = \frac{3000 \times 0,003}{2} \rightarrow H = 4,5kN$$



Na figura 6 pode ser visualizada a aplicação das cargas nocionais.

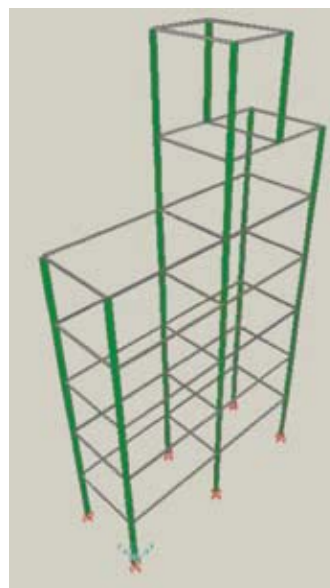
FIGURA 6: Cargas Nocionais

Os elementos de colunas são formados por duas barras para a correta aquisição dos deslocamentos e para o correto funcionamento do efeito P-delta, como mostrado no modelo de coluna no início deste trabalho. As análises de deslocamento foram efetuadas no SAP2000 14.1, onde o modelo com a geometria mostrada nas figuras acima foi analisado com análise

linear elástica e análise não linear com efeito P-delta. O primeiro modelo de análise é formado por pórticos rígidos com base engastada e os perfis das colunas estão na menor inércia em relação a aplicação da carga nocional.

Andar	$\Delta_{1^{\circ} ordem}$ [mm]	$\Delta_{2^{\circ} ordem}$ [mm]	$\frac{\Delta_{2^{\circ} ordem}}{\Delta_{2^{\circ} ordem}}$
1	266,30	321,91	1,206
2	736,82	913,99	1,240
3	1194,62	1492,60	1,251
4	1571,10	1958,62	1,246
5	1849,26	2292,46	1,240
6	2033,17	2506,93	1,233
7	2166,01	2657,74	1,227

TABELA 2 - Edifício de múltiplos andares - Aporticados menor inércia



Na figura 7 pode ser visualizada a orientação da seção das colunas.

FIGURA 7:
Orientação da
seção das colunas

Efetuuou-se também uma análise com a estrutura travada por travamento vertical no sentido da aplicação da carga nocional. Os deslocamentos podem ser visualizados na figura a seguir.

O maior evento da
Construção Metálica da
América Latina

VEM AÍ O **CONSTRUMETAL2012**

21 a 23 de agosto
informações e reservas
(11) 3816 6597
www.abcem.org.br
www.construmetal.com.br



realização



ABCEM
Associação Brasileira da
Construção Metálica

Andar	$\Delta_{1^{\circ}ordem}$ [mm]	$\Delta_{2^{\circ}ordem}$ [mm]	$\Delta_{2^{\circ}ordem} / \Delta_{1^{\circ}ordem}$
1	6,70	6,73	1,004
2	13,23	13,27	1,003
3	19,11	19,16	1,003
4	24,25	24,32	1,003
5	28,53	28,61	1,003
6	31,89	31,98	1,003
7	35,14	35,24	1,003

TABELA 3 - Edifício de múltiplos andares - contraventado menor inércia

Na figura 8 pode ser visualizada a orientação da seção das colunas.

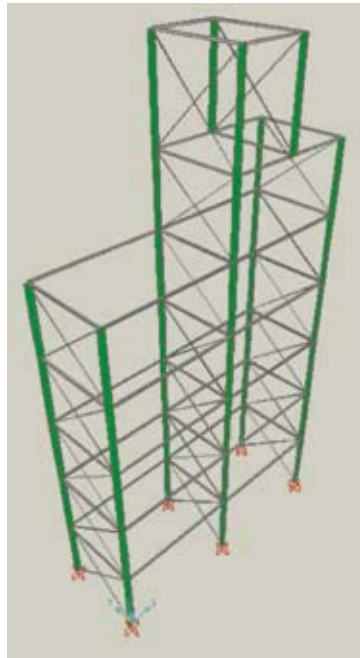
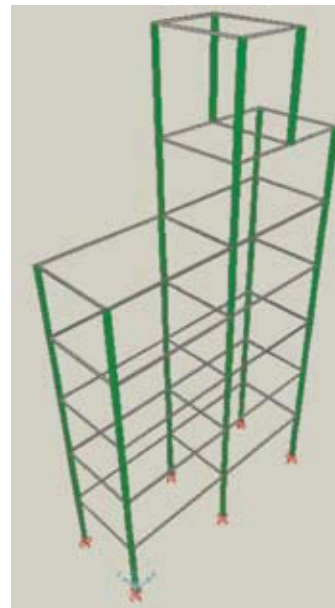


FIGURA 8: Orientação da seção das colunas da estrutura contraventada

Uma análise com a seção das colunas na maior inércia foi feita para verificar os deslocamentos da estrutura. A tabela 4 mostra estes deslocamentos.

Andar	$\Delta_{1^{\circ}ordem}$ [mm]	$\Delta_{2^{\circ}ordem}$ [mm]	$\Delta_{2^{\circ}ordem} / \Delta_{1^{\circ}ordem}$
1	2,62	2,82	1,076
2	8,73	9,48	1,086
3	16,39	17,90	1,092
4	24,35	26,69	1,096
5	31,86	35,02	1,099
6	38,62	42,54	1,102
7	46,16	50,92	1,103

TABELA 4 - Edifícios de Múltiplos andares - aporticado maior inércia



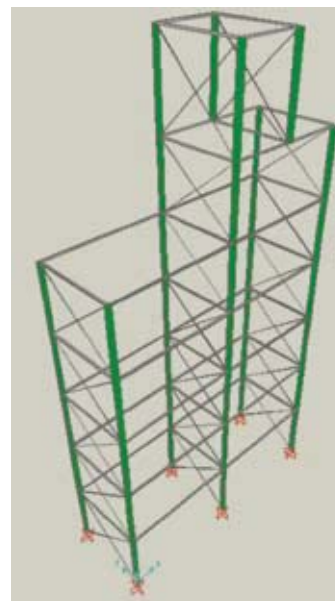
Na figura 9 pode ser visualizada a orientação da seção das colunas.

FIGURA 9: Orientação da seção das colunas da estrutura aporticada

Efetuuou-se também uma análise com a estrutura e com colunas na maior inércia e travada por travamento vertical no sentido da aplicação da carga nocional.

Andar	$\Delta_{1^{\circ}ordem}$ [mm]	$\Delta_{2^{\circ}ordem}$ [mm]	$\Delta_{2^{\circ}ordem} / \Delta_{1^{\circ}ordem}$
1	5,36	5,38	1,004
2	11,95	11,98	1,003
3	17,78	17,83	1,003
4	22,89	22,94	1,002
5	27,13	27,19	1,002
6	30,49	30,55	1,002
7	45,04	45,12	1,002

TABELA 5 - Edifício de múltiplos andares - Contraventamento maior inércia



Na figura 10 pode ser visualizada a orientação da seção das colunas e os travamentos verticais.

FIGURA 10: Orientação da seção das colunas da estrutura contraventada

Outra análise utilizando elementos em balanço foi feita para verificar a influência destes elementos em uma análise de estabilidade com efeito P-delta. Os elementos adicionados foram vigas com perfil W200X35.9, com uma carga gravitacional distribuída de 0,3kN/mm e uma carga nocional da ponta da viga de 3kN na direção x. A figura 11 mostra as vigas adicionadas.

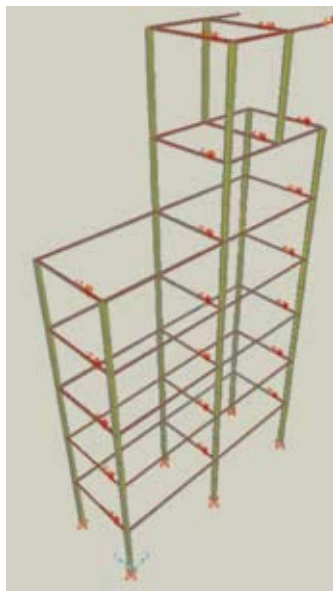


FIGURA 11: Elementos de vigas em balanço adicionados a estrutura

Os deslocamentos horizontais da viga em balanço com carga horizontal nos dois eixos principais podem ser visualizados na tabela 6.

Nó 60	$\Delta_{1^\circ \text{ ordem}}$ [mm]	$\Delta_{2^\circ \text{ ordem}}$ [mm]	$\Delta_{2^\circ \text{ ordem}} / \Delta_{1^\circ \text{ ordem}}$
X	18,63	23,94	1,285
Y	918,89	1212,19	1,319

TABELA 6 - Deslocamentos nas vigas em balanço adicionados a estrutura

Pode-se dizer que quanto maior é a rigidez da estrutura, menor é a influência dos efeitos de segunda ordem. A altura da estrutura em relação a sua base também é um fator que tem influência direta nos efeitos de segunda ordem. A rigor, estruturas contraventadas não têm influência direta nos efeitos de segunda ordem, apenas na estabilidade da estrutura, entretanto nos exemplos mostrados neste trabalho, como a estrutura possui apenas um vão na direção transversal, direção essa a direção das cargas nocionais, o contraventamento dos vãos determinou uma certa diminuição dos efeitos de segunda ordem. ■

BIBLIOGRAFIA

- [1] CHEN, W.F. *Design of Beam-Columns in Steel Frames in the United States*. Thin-Walled Structures, 1991.
- [2] ABNT NBR8800:2008; *Projetos de estruturas de aço e de estrutura mista de aço e concreto de edifícios*; Segunda edição 25.08.2008, Válida a partir de 25.09.2008;
- [3] AISC ANSI 360:05 – *American institute of steel construction, LRFD – Load Resistance Factor Design*, – Metric Conversion of the Third Edition 2005;
- [4] SOUZA, Alex Sander Clemente de. *Análise de Estabilidade de Edifícios de Andares Múltiplos*. São Carlos: 2005.
- [5] LOPES, Pires Arlindo. *Estudos sobre diferentes métodos de análise p-delta: Teoria e Prática na Engenharia Civil*, 2005.

Fixador Autoperfurante DUBMETAL

MANZATO

Tecnologia e Qualidade em Fixadores Autoperfurantes e Auto-atarraxantes

Corpo e cabeça em aço inoxidável série 300

Alta resistência à corrosão e ótima performance de perfuração

Ponta broca em aço carbono

METALÚRGICA MANZATO LTDA | Rua Sarmento Leite, 2041 | CEP 95084-000 | Caxias do Sul - RS
 Fone (54) 3290-8000 - Fax (54) 3290-8007 | vendas@manzato.com.br | www.manzato.com.br