Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções - CBPAT 2018

Abril de 2018

ESTUDO COMPARATIVO DE PRESCRIÇÕES NORMATIVAS PARA REALIZAÇÃO DE ANÁLISE ESTRUTURAL DE SEGUNDA ORDEM EM ESTRUTURAS DE AÇO

B. DIAS BREDA
Engenheiro Civil
Universidade Federal do Espírito Santo
Vitória-ES, Brasil
breno.breda@hotmail.com

G. DE FREITAS RORIZ LIMA
Engenheiro Civil
Universidade Federal de Viçosa
Viçosa-MG, Brasil
guilhermerorizlima@gmail.com

J. L. RANGEL PAES
Dr. Engenheiro Civil
Universidade Federal de Viçosa
Viçosa-MG, Brasil
jlrangel@ufv.br

G. LIMA VIEIRA
Dra. Engenheira Civil
Universidade Federal do Espírito Santo
Vitória-ES, Brasil
geilma.vieira@gmail.com

RESUMO

Sistemas estruturais são responsáveis por resistirem a esforços solicitantes e este provocam deformações nas estruturas. As deformações estruturais excessivas geram manifestações patológicas significativas e por isso devem ser propriamente consideradas na análise estrutural. O fato de algumas estruturas de aço terem altas deformações faz com que estas sejam mais susceptíveis aos efeitos de segunda ordem. Surge assim a necessidade de conhecer os mecanismos que provocam tais efeitos no comportamento das estruturas. Atualmente, há uma gama de prescrições normativas e métodos de análise estrutural que consideram os efeitos de segunda ordem. Desse modo, este trabalho tem como objetivo estudar os resultados obtidos por diferentes prescrições normativas e considerações para execução de análise estrutural de segunda ordem em estruturas de aço. Para obter estes resultados, estudos de caso foram realizados com ajuda de ferramentas computacionais, seguindo métodos e prescrições da norma brasileira NBR 8800 (ABNT, 2008) e a norma americana AISC (2010) para análises estruturais. As análises computacionais concluíram que efeitos de segunda ordem tem influência no dimensionamento de estruturas de aço. A determinação de tais efeitos deve ser feita utilizando ferramentas, metodologias e considerações apropriadas a fim de obter uma estrutura bem dimensionada considerando segurança, economia e controle da deformação estrutural desde a fase de projeto.
Palavras-chave: Segunda. Ordem. Análise. Deformação. Aço.

ABSTRACT

Structural systems are responsible for resisting to applied efforts and these cause deformations in the structures. The excessive structural deformations generate significant pathological manifestations and therefore must be properly considered in the structural analysis. The fact of some steel structures to have high deformations makes them more susceptible to the second order effects. This raises the necessity to know the mechanisms that provoke such effects in the structures behavior. Nowadays, there is a range of normative prescriptions and methods of structural analysis that take the second order effects into account. Thus, this work has as objective to study the results obtained by different normative prescriptions and considerations to utilization of structural analysis of second order in steel structures. To obtain these results, case studies are carried out with the help of computational tools, following methods and prescriptions of the Brazilian standard NBR 8800 (ABNT, 2008) and the American standard AISC (2010) for structural analysis. The computational analysis concluded that the second order effects have influence in the design of steel structures. The determination of such effects must be done using appropriate tools, methodologies and considerations in order to obtain a structure well dimensioned considering safety, economy and control of structural deformation since the design phase.
Keywords: Second. Order. Analysis. Deforrmation. Steel.

1. INTRODUÇÃO

Os efeitos de segunda ordem são divididos em dois tipos: efeito *P-Δ* e efeito *P-δ*. Estes dois efeitos diferem entre si pelo modo como são gerados e pelos resultados que provocam na estrutura.

O efeito *P-Δ* é aquele que gera um acréscimo nos esforços devido ao deslocamento diferencial entre as extremidades de uma barra submetida a esforço axial. Um exemplo de estrutura submetida ao efeito *P-Δ* é ilustrado na Figura 1.

Já o efeito *P-δ* é aquele que gera um acréscimo nos esforços devido ao empenamento das barras comprimidas da estrutura. Um exemplo de colunas com curvatura simples e reversa, submetidas ao efeito *P-δ*, é ilustrado na Figura 2.

Figura 1 - Efeito P-Δ.

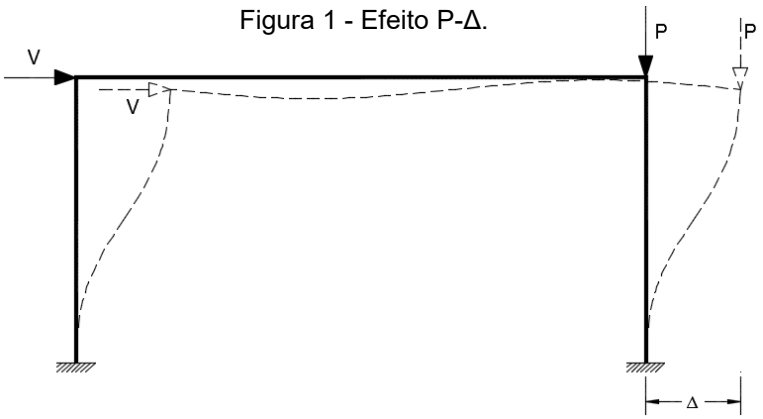
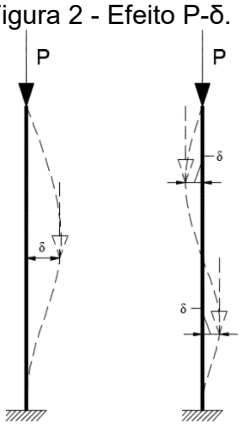


Figura 2 - Efeito P-δ.



Na estrutura esquematizada na Figura 1, a força horizontal *V* causa um deslocamento *Δ*, também horizontal. Simultaneamente, a força vertical P atua na estrutura deslocada. Estes dois efeitos provocam um momento, gerado pela força P multiplicada por um braço de alavanca *Δ*. Este momento extra, causado pela deformação horizontal *Δ*, atua na estrutura gerando um acréscimo nos esforços.

O efeito *P-Δ* pode ser classificado como efeito de segunda ordem global, pois refere-se à deformação da estrutura como um todo, não sendo necessária a deformação local das barras para que este efeito atue sobre a estrutura. Este efeito possui o mesmo comportamento dos deslocamentos provenientes das imperfeições geométricas globais, como as estruturas montadas fora de purmo, porém as causas são de naturezas diferentes.

Na estrutura da Figura 2, a deformação local das barras implica no surgimento de um momento gerado pela força P multiplicada por um braço de alavanca δ. Esse momento extra, causado pelo empenamento das barras, atua na estrutura gerando um acréscimo nos esforços.

O efeito *P-δ* pode ser classificado como efeito de segunda ordem local, pois refere-se à deformação das barras individualmente, não sendo necessária a deformação global da estrutura para que este efeito atue sobre as barras. Tal comportamento é similar ao efeito resultante das imperfeições geométricas locais, como estrutura composta por barras com falta de retinilidade, entretanto as causas desses comportamentos são diferentes.

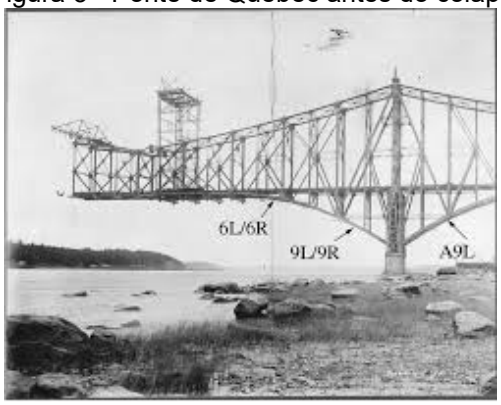
Tais efeitos são acentuados quando os elementos estruturais e estruturas apresentam imperfeições iniciais como falta de retinilidade e a estrutura montada fora do prumo.

A consideração dos efeitos de segunda ordem faz o engenheiro, no processo de análise estrutural, se aproximar mais do comportamento real da estrutura e, por consequência, dos valores reais dos deslocamentos estruturais. Com informações mais precisas ele pode analisar melhor os elementos estruturais e de vedação que trabalharão em conjunto com a estrutura metálica e assim adotar as medidas necessárias para que o sistema, como um todo, trabalhe dentro de um regime de deformações previstas, a fim de se evitar desde manifestações patológicas nos sistemas de vedação, ou, até mesmo, evitar o colapso estrutural, como o ocorrido, segundo Pearson e Delatte (2006), no caso da Ponte de Quebec (Figura 3), no Canadá, que colapsou em 29 de agosto de 1907 (Figura 4), devido a não consideração dos efeitos de degeneração da rigidez do material causados pelos efeitos de segunda ordem e agravado pela falta de retinilidade das barras.

Métodos computacionais desenvolvidos atualmente vêm se aperfeiçoando na implementação mais real desse efeito de segunda ordem, focando na atuação dele como agente degenerador da rigidez, bem como o efeito da plastificação gradual da seção transversal, abandonando abordagens antigas e limitadas que consideravam efeitos de segunda ordem através da majoração dos esforços solicitantes. Isso pode ser observado em Chiorean, C. G. (2009) e Kim, S. E. et al. (2001).

Devido à disponibilidade de variados métodos de análise estrutural, incluindo métodos recentes presentes no AISC (2010) e não contemplados pela NBR 8800 (ABNT, 2008), este trabalho tem como objetivo desenvolver um estudo comparativo dos resultados obtidos por diferentes prescrições normativas, programas computacionais e considerações para execução de análise estrutural de segunda ordem em estruturas de aço.

Figura 3 - Ponte de Quebec antes do colapso.



Fonte: Pearson e Delatte, 2006

Figura 4 - Ponte de Quebec colapsada.



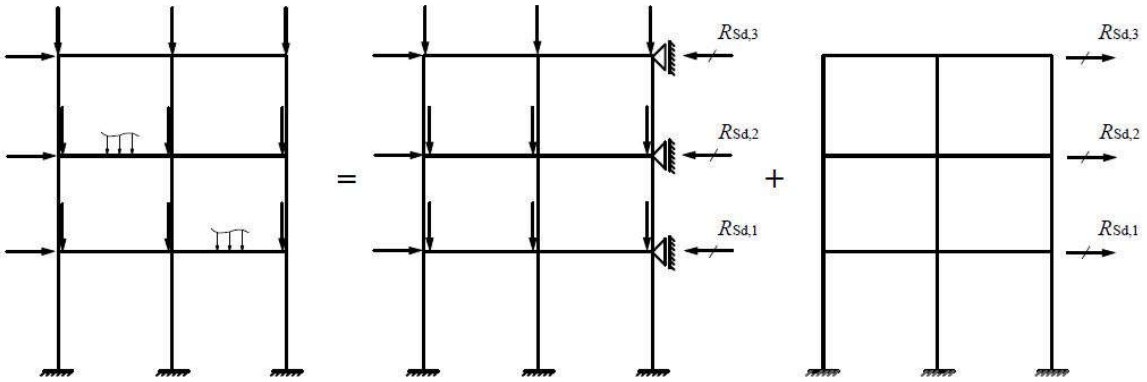
Fonte: Pearson e Delatte, 2006D

2. METODOLOGIA

2.1 Método de Amplificação dos Esforços Solicitantes - MAES

O MAES é uma alternativa aos métodos computacionais. Neste método, apresentado no Anexo D da NBR 8800 (ABNT, 2008) e no Apêndice 8 do AISC (2010), os efeitos de segunda ordem são considerados por meio da majoração dos resultados de análises de primeira ordem realizadas em duas subestruturas, que somadas, representam a estrutura original. Os modelos das subestruturas são representados na Figura 5.

Figura 5 - Subestruturas para análise pelo MAES.



Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008).

A estrutura *nt* (*no translation*) é a representação da estrutura original com deslocamento lateral dos nós impedidos. Ela é usada na consideração do efeito *P-δ*. Já a estrutura *lt* (*lateral translation*) representa as ações laterais atuando sobre a estrutura original com o deslocamento lateral permitido. Ela é utilizada na consideração do efeito *P-Δ*.

No MAES, o momento fletor solicitante e a força axial solicitante de cálculo, M_{sd} e N_{sd}, são determinados por:

$$M_{Sd} = B_1 M_{nt} + B_2 M_{lt} \quad (1)$$

$$N_{Sd} = N_{nt} + B_2 N_{lt} \quad (2)$$

O Coeficiente B_1 é calculado por:

$$B_1 = \frac{C_m}{1 - N_{Sd1} / N_e} \geq 1{,}0 \quad (3)$$

Onde:

$C_m = 0{,}6 - 0{,}4(M_{nt1} / M_{nt2})$, para colunas submetidas à flexo-compressão sem cargas inversas, M_{nt1}/M_{nt2} é a razão entre o menor e o maior dos momentos fletores solicitantes, tomados nas extremidades da barra, positiva para curvatura reversa e negativa para curvatura simples;

N_{Sd1} = é a força axial de compressão solicitante de cálculo na barra considerada, em análise de primeira ordem. ($N_{Sd1} = N_{nt} + N_{lt}$) (kN);

$N_e = \pi^2 EI / L^2$, é a força axial que provoca a flambagem elástica por flexão da barra no plano de atuação do momento fletor, calculada com o comprimento real da barra, considerando, se for o caso, a imperfeição inicial de material.

O Coeficiente B_2 é dado por:

$$B_2 = \frac{1}{1 - \frac{1}{R_S} \frac{\Delta_h}{H} \frac{\Sigma N_{Sd}}{\Sigma H_{Sd}}} \quad (4)$$

Onde:

ΣN_{Sd} = é carga gravitacional total que atua no andar considerado, englobando as cargas atuantes nas subestruturas de contraventamento e nas barras que não pertençam a estas subestruturas;

R_s = é um coeficiente de ajuste, igual a 0,85 nas estruturas onde o sistema resistente a ações horizontais é constituído apenas por subestruturas de contraventamento formadas por pórticos rígidos e igual a 1 para as outras estruturas;

Δh = é o deslocamento horizontal relativo entre os níveis superior e inferior (deslocamento interpavimento) do andar considerado, obtido da análise de primeira ordem, na estrutura original ou na estrutura *lt*. Se Δh possuir valores diferentes em um mesmo andar, deve ser tomado um valor ponderado para este deslocamento em função da proporção das cargas gravitacionais atuantes ou, de modo conservador, o maior valor;

ΣH_{Sd} = é a força cortante no andar, produzida pelas forças horizontais de cálculo atuantes, usadas para determinar Δh e obtida na estrutura original ou na estrutura *lt*;

H = é a altura do andar (distância entre eixos de vigas de dois andares consecutivos ou entre eixos de vigas e a base, no caso do primeiro andar).

2.2 Método de Análise Direta – MAD

O MAD, apresentado no AISC (2010), consiste em um método de análise estrutural que não possui restrições para sua aplicação e, de maneira geral, nele é realizada uma análise de segunda ordem considerando as imperfeições iniciais geométricas e de material.

As imperfeições iniciais geométricas globais (estrutura fora do prumo) podem ser modeladas diretamente, ou então serem contabilizadas por meio de Forças Nocionais. Já os efeitos das imperfeições iniciais geométricas locais (falta de retilineidade das barras) são contabilizados por meio da redução da rigidez do material.

É permitida, em estruturas de pequena deslocabilidade lateral, a desconsideração das imperfeições iniciais geométricas globais nos casos de carregamento com ação de outras cargas horizontais, como o vento.

Nas barras em que é necessária a aplicação do Fator de Redução da Rigidez (τ_b), ou seja, barras submetidas a uma tensão axial de compressão maior que a metade da sua tensão de escoamento (f_y), é permitida que a contabilização dos efeitos das tensões residuais seja feita por meio de um acréscimo de 0,1% das cargas gravitacionais atuantes no andar às Forças Nocionais, o que torna o valor desta de 0,3% das cargas gravitacionais atuantes no andar, neste caso.

Seguindo este método, deve-se adotar o comprimento real das barras nas equações de dimensionamento, ou seja, adota-se o Coeficiente de Flambagem $K = 1$.

O MAD, devido à necessidade de sucessivos cálculos, torna sua execução manual inviável e por isso depende de programas computacionais para sua aplicação. Neste trabalho o método é aplicado com o auxílio do MASTAN2 e do SAP2000.

2.2.1 MASTAN2

O MASTAN2 é um programa educacional que realiza análise incremental iterativa que pode considerar ou não as não-linearidades geométrica e de material. Na imagem da interface do programa na Figura 6 podem-se observar as opções de análise que o programa oferece e os parâmetros de uma análise de segunda ordem inelástica.

O programa usa um modelo de rótulas plásticas na consideração da não-linearidade de material. O programa permite também a utilização do Módulo de Elasticidade Tangente (E_t) do material, que considera o Fator de Redução da Rigidez (τ_b) automaticamente na análise.

Para uma melhor consideração dos efeitos que causam as não-linearidades geométricas e de material, e seguindo recomendação dos desenvolvedores do programa, as barras analisadas são subdivididas em 4 partes iguais nas análises realizadas com o MASTAN2.

Neste trabalho são analisados apenas pórticos planos, sendo assim o programa é ajustado para realizar análises apenas no plano do pórtico (*Planar Frame*).

2.2.2 SAP2000

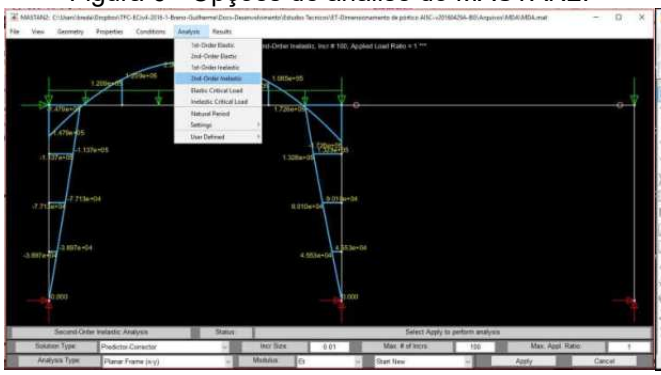
O SAP2000 é um programa destinado à análise estrutural e verificação da capacidade última de estruturas em geral, desenvolvido pela Computers and Structures Incorporation. Também realiza análise incremental iterativa considerando as não-linearidades geométrica e de material. Na imagem da interface do programa da Figura 7 é observada a determinação do carregamento para uma análise não-linear.

O SAP2000 considera a inelasticidade do material por meio de um modelo de análise de rótulas plásticas. O programa aplica à estrutura o Fator de Redução da Rigidez (τ_b) quando é realizada a verificação do dimensionamento. Ele também considera as Forças Nocionais automaticamente, quando estas são acrescentadas aos casos de carregamento.

Para uma melhor consideração dos efeitos que causam as não-linearidades geométricas e de material, e seguindo recomendação contida no manual do programa, as barras analisadas são subdivididas em 4 partes iguais nas análises realizadas neste trabalho com o SAP2000.

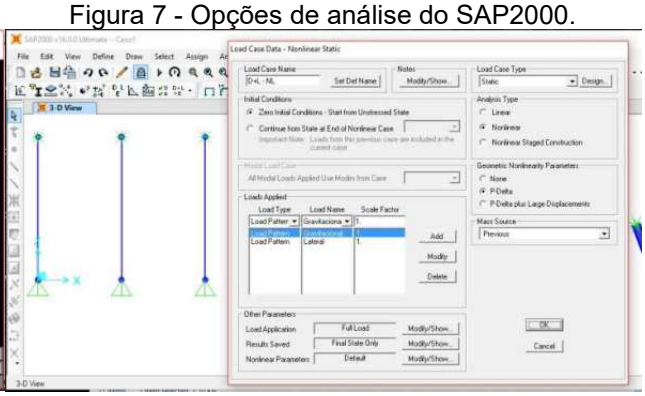
As estruturas planas deste trabalho são analisadas optando-se pela análise do tipo "*Plane Frame*".

Figura 6 - Opções de análise do MASTAN2.



Fonte: Ziemian, R. D. e McGuire, W., 2015.

Figura 7 - Opções de análise do SAP2000.



Fonte: Computers and Structures, 2013.

2.2.3 Método Initial *P-Δ*

Este método é uma opção do programa SAP2000 apresentada em seu manual. Nele, em um primeiro momento, é executada uma análise não-linear, apenas com as cargas devidas ao peso-próprio e parcela da carga acidental. Em um segundo momento, a carga horizontal e a parcela restante da carga acidental são aplicadas à estrutura deformada pela análise não-linear anterior e uma análise de primeira ordem é então executada.

A grande vantagem deste método é permitir a execução de análises dinâmicas, como por exemplo uma análise de vibração da estrutura, que considerem os efeitos de segunda ordem. Isso só é possível devido ao fato da última análise executada neste método de análise ser linear, o que permitem que princípios como o da superposição dos efeitos sejam válidos.

2.3 Método de análise de segunda ordem da NBR 8800 (ABNT, 2008) – MASO-NBR 8800 (ABNT, 2008)

A análise estrutural de segunda ordem recomendada pela NBR 8800 (ABNT, 2008) é idêntica ao MAD do AISC (2010), diferindo apenas nos seguintes pontos:

- a força nocional é de 0,3% da carga gravitacional, diferente dos 0,2% recomendado pelo AISC (2010);

- o efeito das tensões residuais não precisa ser levado em conta, ou seja, τ_b é igual a 1,0.

2.4 Método dos Comprimentos Efetivos - MCE

O MCE é método de análise estrutural alternativo ao MAD. Sua aplicação fica limitada a estruturas de pequena deslocabilidade lateral e a análise deve considerar os efeitos das imperfeições iniciais geométricas globais aplicando-se as Forças Nocionais, não sendo permitida a consideração destas por meio de modelagem direta.

A rigidez da estrutura não é reduzida nesta análise, pois seus efeitos são considerados utilizando-se Coeficiente de Flambagem *K*.

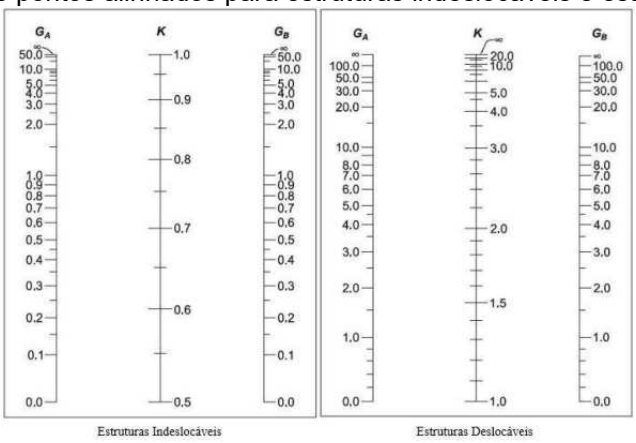
Fica permitida a adoção de *K* = 1 em estruturas que apresentem deslocabilidade lateral (u_2/u_1 ou B_2) menor que 1,1.

Encontram-se em literaturas técnicas vários métodos para se calcular o Coeficiente *K*. Aqui são apresentados o Método dos Ábacos de Pontos Alinhados e a Abordagem pela Rigidez do Pórtico.

2.4.1 Método dos Ábacos de Pontos Alinhados - MAPA

O MAPA consiste em um método para a determinação do Coeficiente de Flambagem *K* é o método mais comum usado na determinação do Coeficiente *K*, que é obtido por meio dos ábacos apresentados na Figura 8.

Figura 8 - Ábacos de pontos alinhados para estruturas indeslocáveis e estruturas deslocáveis.



Fonte: ASCE, 1997.

Os Coeficientes G_A e G_B, nos ábacos da Figura 8, são calculados em relação a todas as colunas e vigas que convergem em uma das extremidades de uma barra. Uma extremidade é representada pelo subscrito A e a extremidade oposta pelo subscrito B. G é dado pela Equação 5:

$$G = \frac{\sum (EI/L)_C}{\sum (EI/L)_V} \tag{5}$$

Em que o subscrito '*c*' refere-se às colunas e '*v*' às vigas.

Os ábacos deste método foram montados segundo as seguintes premissas:

1) A estrutura possui comportamento puramente elástico;
2) todas as barras possuem seção transversal constante;
3) todas as ligações são rígidas;
4) para colunas em estruturas indeslocáveis, a rotação das extremidades opostas de vigas rigidamente conectadas são iguais em magnitude e opostas em direção, produzindo flexão de curvatura simples;
5) para colunas em estruturas deslocáveis, a rotação das extremidades opostas de vigas rigidamente conectadas são iguais em magnitude e direção, produzindo flexão de curvatura reversa;
6) os parâmetros de rigidez $L\sqrt{(P/EI)}$ de todas as colunas são iguais;
7) o momento que gera a rotação das ligações é distribuído para cada coluna na ligação, na proporção de *EI/L* de cada coluna;
8) todas as colunas flambam simultaneamente;
9) as vigas não possuem força axial significante.

2.5 Método de Análise de Primeira Ordem – MAPO

Classificado por Ziemian, R. D. (2010) como uma adaptação do MAD, ele é aplicável apenas a estruturas com pequena deslocabilidade e com barras submetidas a uma tensão axial solicitante menor que a metade da tensão de escoamento do aço.

Neste método realiza-se uma análise de primeira ordem, não sendo necessária a consideração das imperfeições iniciais geométricas, nem da redução da rigidez.

Para uma estimativa dos efeitos de segunda ordem deve-se aplicar uma força horizontal à estrutura. Esta força é dada pela Equação 6.

$$N_i = 2{,}1\left(\Delta / L\right) N_{Sd} \geq 0{,}0042 N_{Sd} \quad (6)$$

Onde:

Δ = deslocamento horizontal máximo;

L = altura do pavimento;

N_{Sd} = carga gravitacional solicitante de cálculo total que atua no andar .

Para a contabilização do efeito *P-δ*, o Coeficiente B_1 do MAES deve ser usado na majoração dos esforços. Neste método ele é calculado tomando-se os dados necessários a partir da estrutura original e não a partir da estrutura *nt*.

3. RESULTADOS

Os estudos de caso nos quais foram aplicados os principais métodos de análise de segunda ordem disponíveis e os métodos de análise estrutural prescritos pela NBR 8800 (ABNT, 2008) e pelo AISC (2010) são apresentados a seguir.

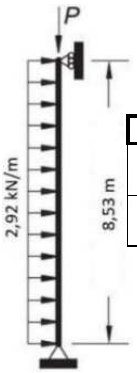
3.1 Estudo de caso 1: avaliação de programas e métodos de análise de segunda ordem

3.1.1 Apresentação

Neste primeiro caso são avaliados os seguintes programas e métodos de análise estrutural de segunda ordem: MASTAN2 e SAP2000; o Método Initial *P-Δ* e o MAES.

Os programas e métodos são avaliados tomando como referência dois casos contidos no AISC (2010), os quais são apresentados com a finalidade de se verificar a consideração do efeito *P-δ* e calibrar ou avaliar a precisão dos programas e métodos de análise de segunda ordem. Utilizou-se, para a realização das análises, um perfil W360x72 e E = 200 GPa. Estes casos e seus valores de referência para momento fletor e deslocamento máximos são exibidos na Figura 9 e na Figura 10.

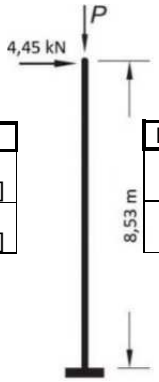
Figura 9 - Modelo 1 do AISC (2010), avaliação do efeito P-δ.



Força axial, *P* (kN)	0	667	1334	2001
M_{mid} (kN.m)	26,6 [26,6]	30,5 [30,4]	35,7 [35,4]	43,0 [42,4]
Δ_{mid} (mm)	5,13 [5,02]	5,86 [5,71]	6,84 [6,63]	8,21 [7,91]

Fonte: AISC, 2010.

Figura 10 - Modelo 2 do AISC (2010), avaliação dos efeitos P-Δ e P-δ.



Força axial, *P* (kN)	0	445	667	890
M_{base} (kN.m)	38,0 [38,0]	53,2 [53,1]	68,1 [67,7]	97,2 [96,2]
Δ_{top} (mm)	23,1 [22,9]	34,2 [33,9]	45,1 [44,6]	66,6 [65,4]

Fonte: AISC, 2010.

Os valores de referência entre colchetes da Figura 9 e Figura 10 excluem o efeito da deformação pela força cortante. Os demais valores incluem deformações causadas pela força axial, momento fletor e força cortante.

3.1.2 Resultados das análises

Os resultados obtidos para cada programa e método e a variação em relação aos valores de referência do AISC (2010) são apresentados a seguir, com exceção dos deslocamentos pelo MAES, pois este método não determina as deformações.

Tabela 1 - Resultados da análise do Modelo 1.

Método de Análise	Momento Fletor Máximo (kN.m)				Deslocamento Máximo (mm)			
	Força axial, P (kN)				Força axial, P (kN)			
	0	667	1334	2001	0	667	1334	2001
MAES	26,6 (0,0%)	30,3 (-0,7%)	35,4 (-0,8%)	42,4 (-1,4%)	-	-	-	-
MAES (sem cortante)	26,6 (0,0%)	30,3 (-0,3%)	35,4 (0,0%)	42,4 (0,0%)	-	-	-	-
MASTAN2	26,6 (0,0%)	30,3 (0,7%)	35,3 (-1,1%)	42,0 (-2,4%)	4,98 (-3,0%)	5,65 (-3,7%)	6,53 (-4,7%)	7,74 (-6,1%)
MASTAN2 (sem cortante)	26,6 (0,0%)	30,3 (-0,3%)	35,3 (-0,3%)	42,0 (-1,0%)	4,98 (-0,8%)	5,65 (-1,1%)	6,53 (-1,5%)	7,74 (-2,2%)
SAP2000	26,6 (0,0%)	30,5 (0,0%)	35,5 (-0,6%)	42,1 (-2,1%)	5,12 (-0,2%)	5,86 (-0,0%)	6,81 (-0,4%)	8,05 (-2,0%)
Initial *P-Δ*	26,6 (0,0%)	30,5 (0,0%)	35,7 (0,0%)	43,0 (0,0%)	5,12 (-0,2%)	5,86 (0,0%)	6,84 (0,0%)	8,21 (0,0%)

Tabela 2 - Resultado da análise do Modelo 2.

Método de Análise	Momento Fletor Máximo (kN.m)				Deslocamento Máximo (mm)			
	Força axial, P (kN)				Força axial, P (kN)			
	0	445	667	890	0	445	667	890
MAES	38,0 (0,0%)	52,1 (-2,1%)	63,8 (-6,7%)	82,8 (-17,4%)	-	-	-	-
MAES (sem cortante)	38,0 (0,0%)	52,1 (-1,9%)	63,8 (-6,1%)	82,8 (-16,2%)	-	-	-	-
MASTAN2	38,0 (0,0%)	52,9 (-0,6%)	67,2 (-1,3%)	94,7 (-2,6%)	22,8 (-1,3%)	33,5 (-2,1%)	43,9 (-2,7%)	63,8 (-4,4%)
MASTAN2 (sem cortante)	38,0 (0,0%)	52,9 (-0,4%)	67,2 (-0,7%)	94,7 (-1,6%)	22,8 (-0,4%)	33,5 (-1,2%)	43,9 (-1,6%)	63,8 (-4,1%)
SAP2000	38,0 (0,0%)	53,2 (0,0%)	68,0 (-0,1%)	95,8 (-1,5%)	23,1 (0,0%)	34,2 (0,0%)	45,1 (0,0%)	65,6 (-1,5%)
Initial *P-Δ*	38,0 (0,0%)	53,2 (0,0%)	68,0 (-0,1%)	97,2 (0,0%)	23,1 (0,0%)	34,2 (0,0%)	45,1 (0,0%)	66,6 (0,0%)

3.1.3 Conclusão do estudo de caso

De modo geral, observou-se que todos os métodos determinam os esforços de segunda ordem com boa precisão. Esta precisão diminui com o aumento da carga axial, porém as cargas axiais mais altas destes modelos de referência são maiores que a capacidade da coluna. No nível de carga de estruturas bem dimensionadas, todos os métodos apresentaram grande precisão na determinação, considerando ambos efeitos *P-Δ* e *P-δ*. Sendo que tanto o MAES quanto o MASTAN2 se aproximam mais dos valores de referência que desconsideram a deformação pelo esforço cortante. Já na determinção dos deslocamentos, diferenças significativas foram observadas para os resultados do programa MASTAN2. Para uma avaliação completa dos métodos de análise de segunda ordem outros exemplos de referência, que avaliem outros parâmetros da análise, devem ser usados.

3.2 Estudo de Caso 2: Comparação entre o Uso de Forças Nocionais e Modelagem Direta na Consideração das Imperfeições Iniciais Globais

3.2.1 Apresentação

A NBR 8800 (ABNT, 2008) e o AISC (2010) prescrevem que as análises estruturais de segunda ordem devem considerar as imperfeições iniciais geométricas globais, ou desaprumo da estrutura, sendo permitida sua desconsideração em estruturas de baixa deslocabilidade estrutural em combinações de carregamento em que atuem outras ações horizontais, como a força devido ao vento.

O desaprumo da estrutura pode ser modelado diretamente, ou então ser considerado aplicando-se as Forças Nocionais. O programa MASTAN2 é utilizado nas análises deste caso. Ele permite essa modelagem direta por meio de dois modos diferentes, que também fazem parte deste estudo:

- **Modelagem Direta - Modo 1:** a estrutura fora de prumo é modelada com o topo de cada pilar deslocado horizontalmente em relação à sua base de H/333. Esses deslocamentos devem ser considerados na mesma direção e são acumulativos entre os níveis da estrutura, ou seja, a base de cada pilar é colocada sobre o topo já deslocado do pilar do nível inferior (Figura 11);
- **Modelagem Direta - Modo 2:** um deslocamento de H/333 é aplicado a cada nó da estrutura sem as imperfeições. As barras se deformam para acompanhar esse deslocamento dos nós e deixam de ser retilíneas. A estrutura original é então atualizada para assumir esta forma deformada (Figura 12);
- **Forças Nocionais:** são forças que representam os efeitos da estrutura fora do prumo. Segundo a ABNT NBR 8800 (ABNT, 2008) valem 0,3% das cargas gravitacionais, para representarem o deslocamento de H/333 e devem ser aplicadas horizontalmente no nível de cada andar.

Figura 11 - Imperfeição inicial geométrica Modelagem Direta - Modo 1.

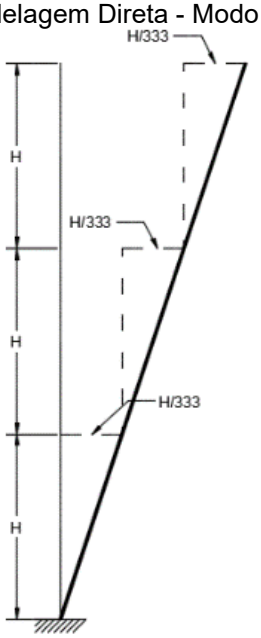
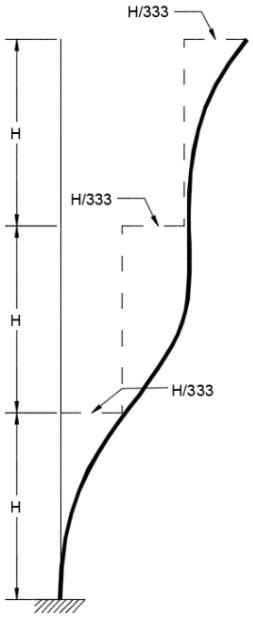
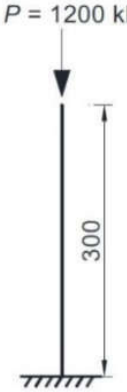


Figura 12 - Imperfeição inicial geométrica Modelagem Direta - Modo 2.



A estrutura analisada neste caso é apresentada na Figura 13, onde, o comprimento é dado em centímetros, a força axial é apresentada já com seu valor de cálculo, o perfil é um HP250x62, constituído por aço ASTM A572 Grau 50.

Figura 13 - Modelo estrutural utilizado para o Estudo de Caso 2.



Fonte: Paes, J. L. R , 2016.

3.2.2 Resultados das análises

Os resultados obtidos para o Estudo de Caso 2 são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Comparação entre os resultados obtidos para o Estudo de Caso 2.

Caso	Esforço Normal		Esforço Cortante		Momento Fletor		Deslocamento Horizontal		Deslocamento Vertical	
	Valor máximo (kN)	Diferença (%)	Valor máximo (kN)	Diferença (%)	Valor máximo (kN.mm)	Diferença (%)	Valor máximo (mm)	Diferença (%)	Valor máximo m(m)	Diferença (%)
Modo 1	1200	-	5,558	-	14810	-	3,325	0,00	-2,835	-
Modo 2	1200	0,00	7,715	38,81	15560	5,06	3,956	18,97	-2,814	-0,74
Força Nocional	1200	0,00	5,582	0,43	14790	-0,14	3,331	0,18	-2,825	-0,35

Os dois modos de modelagem direta e o uso de Forças Nocionais apresentaram os mesmos resultados na determinação dos esforços normais nas barras e muito próximos na determinação do esforço devido ao momento fletor e deslocamentos. A única discrepância ocorreu no resultado de um dos modos de modelagem direta na determinação dos esforços cortantes e do deslocamento horizontal.

3.2.3 Conclusão do estudo de caso

As Forças Nocionais, recomendadas pela NBR 8800 (ABNT, 2008), pelo AISC (2010), e demais normas e códigos internacionais apresentaram resultados muito próximos aos da implementação direta das imperfeições e, em geral, são mais fáceis de serem implementadas nos programas de análise estrutural. Já o modo 2, executado pelo MASTAN2 pode ser utilizado tendo em vista que acrecenta esforços cortantes não existentes na estrutura, sendo assim, este modo está a favor da segurança, porém pode aumentar custos e não prever com exatidão os deslocamentos reais da estrutura.

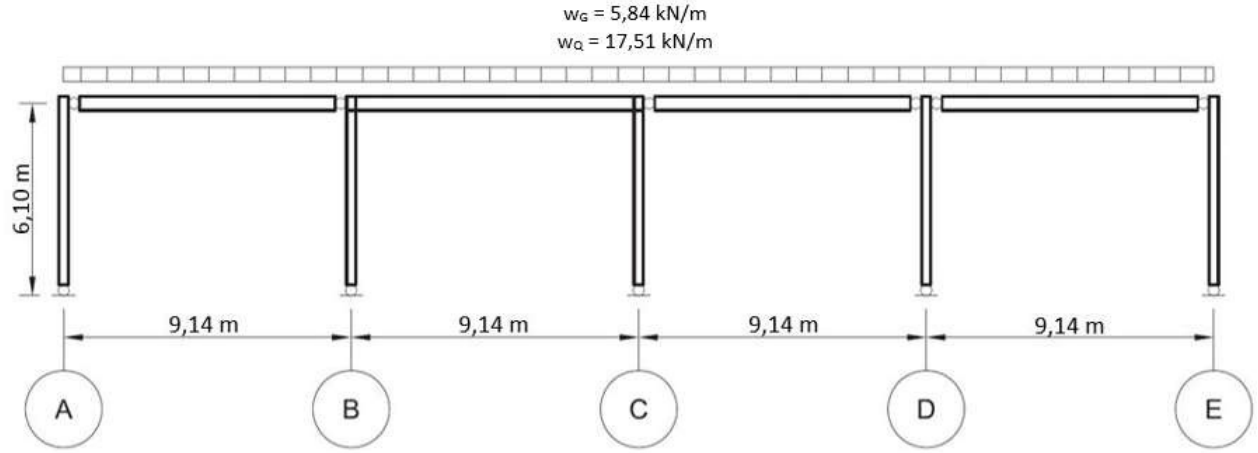
3.3 Estudo de Caso 3: Comparação Entre os Métodos de Análise Estrutural

3.3.1 Apresentação

Com o objetivo de comparar os resultados e a execução da análise estrutural de um pórtico pelos métodos de análise de primeira ordem da NBR 8800 (ABNT, 2008) e do AISC (2010), pelo Método dos Comprimentos Efetivos, pelo Método de Análise Direta e pelo método de segunda ordem recomendado pela NBR 8800 (ABNT, 2008), foi realizada a análise de um pórtico segundo as respectivas prescrições normativas para cada método.

A estrutura escolhida foi retirada de *Design Examples, Version 14.1,* do AISC (2013) e é apresentada na Figura 14.

Figura 14 - Elevação do pórtico.



Fonte: AISC, 2013.

Para a estrutura da Figura 14 as ações estão seus valores característicos, os perfis da viga são o W460x60 e o da coluna são W310x97 e constituídos por aço ASTM A572 Grau 50.

3.3.2 Resultados das análises

O Coeficiente B_2 do MAES foi calculado e a estrutura foi classificada como de pequena deslocabilidade lateral. O nível de tensão devido ao esforço de compressão em relação à tensão de

escoamento da barra também foi calculado, encontrando-se um valor menor que 0,5, logo as tensões residuais não afetam a rigidez da barra.

Por apresentar pequena deslocabilidade lateral e barras submetidas a um nível de tensão menor que a metade da tensão de escoamento, todos os métodos citados podem ser aplicados ao pórtico. Os resultados obtidos para o deslocamento máximo do topo dos pilares são apresentados na Figura 15 e na Figura 16.

Figura 15 - Deslocamentos máximos horizontais dos topos dos pilares (mm).

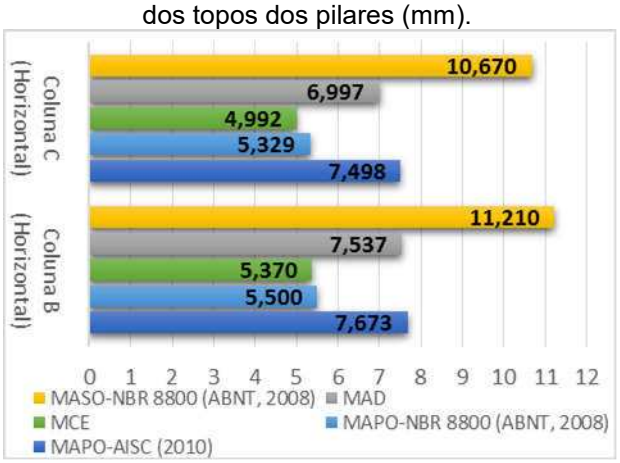
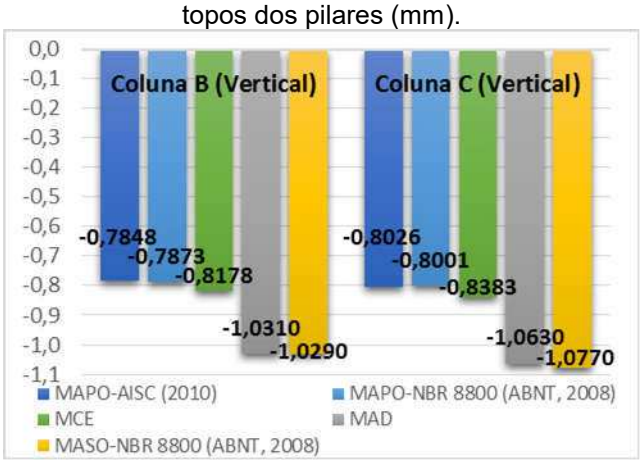


Figura 16 - Deslocamentos máximos verticais dos topos dos pilares (mm).



3.3.3 Conclusão do estudo de caso

Conclui-se que para este pórtico as diferenças encontradas são altas. O MASO-NBR 8800 (ABNT, 2008) apresenta um valor maior para deslocamento horizontal por prever imperfeições iniciais maiores e assim recomendando a utilização de uma força nocional de maior valor do que a MAD do AISC (2010). Tanto o MCE quanto os métodos de análise de primeira ordem preveram deslocamentos significativamente menores que os métodos de análise de segunda ordem, tidos como mais próximos do valor real.

3.4 Estudo de Caso 4: Avaliação da Variação dos Efeitos de Segunda Ordem de um Pórtico de Acordo com o Número de Pavimentos

3.4.1 Apresentação

Com o objetivo de avaliar a variação dos efeitos de segunda ordem acarretadas pelo acréscimo de pavimentos a um pórtico, toma-se o pórtico do Estudo de Caso 3 (Figura 14). A partir dele gera-se outros 4 pórticos, acrescentando-se pavimentos com características idênticas ao do pórtico original e obtendo-se pórticos de 1, 2, 3 e 4 pavimentos.

3.4.2 Resultados das análises

O resultado das análises estruturais, pelo MAD e com APO, para os quatro pórticos analisados, são apresentados na Figura 17 e na Figura 18.

Figura 17 – Deslocamento horizontal no topo da coluna C.

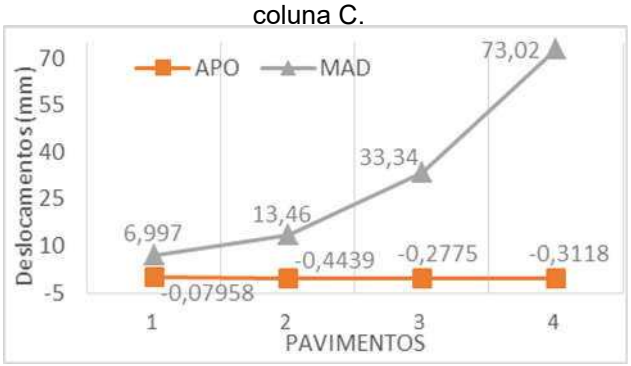
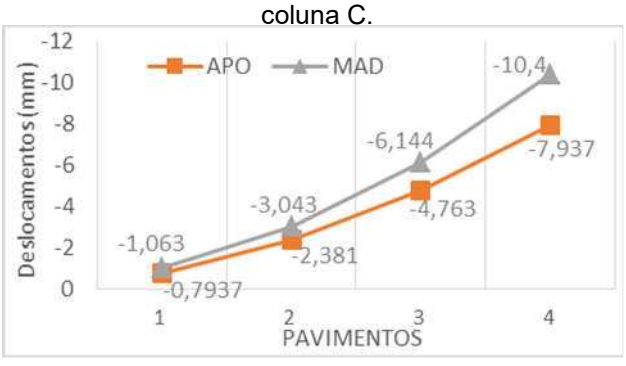


Figura 18- Deslocamento vertical no topo da coluna C.



3.4.3 Conclusão do estudo de caso

Analisando-se os resultados obtidos pelas análises estruturais utilizando o MAD com os respectivos resultados da APO, nota-se que com o aumento do número de pavimentos, as diferenças relativas entre os resultados obtidos pelo MAD e com APO também aumentam. Ou seja, pode-se concluir que os efeitos de segunda ordem são relativamente mais significativos em estruturas com um maior número de pavimentos. Nota-se também a grande diferença entre os deslocamentos horizontais observados, isto deve-se a consideração da força nocional pelo MAD.

4. CONCLUSÕES

Realizado o estudo sobre o efeito de segunda ordem e como ele age na estrutura, estudando os vários tipos de métodos de análise disponíveis e os resultados obtidos por eles, podemos observar que o engenheiro deve ser criterioso na hora de escolher o método a ser utilizados e as considerações que irá fazer, pois estas tem um impacto significativo nos resultados obtidos para esforços e deslocamentos das estruturas.

A fim de se obter resultados mais próximos do comportamento real da estrutura o engenheiro não deve abrir mão de uma análise de segunda ordem, considerando imperfeições geométricas e materiais. Estes efeitos geram uma degeneração da rigidez do material e este efeito é considerado desta maneira apenas no MAD, ao invés dos outros métodos em que tais efeitos são contabilizados através de majoração de esforços solicitantes ou dos comprimentos dos elementos.

Por esse motivo o MAD é considerado como a evolução dos métodos de análise de segunda ordem, ele é o que mais se aproxima de prever o comportamento real da estrutura, sendo um método mais preciso na previsão dos esforços solicitantes e deslocamentos da estrutura. Isso auxilia o engenheiro a prescrever soluções estruturais e materiais de maneira mais assertiva, evitando o surgimento de patologias estruturais ou em outros elementos como a vedação e acabamentos, gerando obras mais seguras e econômicas também.

5. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios – Procedimento. Rio de Janeiro, 2008.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **ANSI/AISC 360-10.** Specification for Structural Steel Buildings. Chicago, 2010.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **Design Examples, Version 14.1.** Chicago, 2013.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Effective Length and Notional Load Approaches for Assessing Frame Stability:** Implications for American Steel Design. New York, 1997.

Chiorean, C. G. **A computer method for nonlinear inelastic analysis of 3D semi-rigid steel frameworks**. Engineering Structures, 31 (12), pp. 3016-33, Elsevier Science Publisher, 2009.

Computers and Structures. **Inc., CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS and SAFE**. Computer and Structures, Inc. Berkley, 2013.

Kim, S. E, Kim, Y., Choi, S. H. **Nonlinear analysis of 3-D steel frames**. Thin Walled Structures, 39, pp, 445–461. Elsevier Science Publisher, 2001.

Paes, J. L. R. **Edifícios Industriais em Estrutura Metálica.** Notas de Aula**.** Viçosa: DEC-UFV, 2016.

Pearson, C., e Delatte, N.. **Collapse of the Quebec Bridge, 1907**. J.Perform. Constr. Facil., 20(1), 84-91, 2-2006.

Ziemian, R. D. **Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures**, 6º Ed., John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, NJ, 2010.

Ziemian, R. D. e McGuire, W., **MASTAN2 v3.5**, John Wiley and Sons Inc. Hoboken, NJ, 2015.