

Implementation of simplified second order estimation method from NBR 8800/2008 as support of structural analysis learning

Antonio P. A. Ferro¹, Otávio B. A. Rodrigues¹, Crismilia A. Santos¹, Bruno F. F. Souza¹, Luciano B. Santos¹

¹*Centro de Tecnologia – CTEC, Universidade Federal de Alagoas - UFAL
Avenida Lourival Melo Mota, S/N, Tabuleiro dos Martins, 57072-970, Maceió/Alagoas, Brasil
antonio.ferro@ctec.ufal.br, otavio.rodrigues@ctec.ufal.br, crismilia.santos@ctec.ufal.br,
bruno.souza@ctec.ufal.br, lbsantos@ctec.ufal.br*

Abstract. Structure analysis aims to obtain appropriate responses like displacements and internal forces in structures. The results are used in limit state design method in order to maintain levels of reliability and safety in structural engineering design. A global structure analysis may be conducted in a geometrically linear approach, also known as a first order analysis, where the structure responses are obtained through equilibrium in an undeformed configuration, or also in a geometrically nonlinear approach, in which additional effects (so-called second-order effects) are determined in a deformed configuration equilibrium. NBR 8800/2008 addresses the recommendations for second-order analysis in steel structures, presenting the possibility of both simplified and rigorous geometric nonlinear analysis. In this context, the standard recommends the simplified method known as amplification coefficient method to determine, through an initial first order analysis, the approximated second-order effects. In this context, this work introduces an application developed using *Python* language to assist steel structure analysis learning. The program presents a first-order and a simplified second-order analysis using direct stiffness method and the amplification coefficient method respectively. An interface is implemented in order to become a useful and easy-to-use tool. It is also presented a comparison between the results from a rigorous geometric nonlinear analysis, using the software *AcadFrame*, and the simplified method aided by the developed software both applied to the same steel structure example.

Keywords: Second-order analysis, NBR 8800/2008, Steel structures.

1 Introdução

Os elementos estruturais em aço apresentam, em geral, seções transversais esbeltas. Como consequência, os perfis de aço utilizados nas estruturas são suscetíveis a fenômenos críticos de instabilidade. Desse modo, para a previsão do comportamento da estrutura e determinação dos esforços efetivos nos elementos, é necessário a aplicação de métodos mais rigorosos de análise estrutural, sendo recomendada pela NBR 8800/2008 [1] a análise não linear geométrica ou, de forma genérica, a análise de segunda ordem. Diferente da tradicional análise linear geométrica, a análise não linear geométrica considera os esforços em uma configuração deslocada, sendo considerada mais apropriada para verificação da estrutura.

A NBR 8800/2008 [1] inclui recomendações para a análise de segunda ordem em estruturas de aço, apresentando a possibilidade de realizar essa análise pelo método simplificado ou rigoroso, a depender dos critérios a serem atendidos. O método rigoroso é executado através de *softwares* apropriados que utilizam formulações numéricas e cujo desenvolvimento geralmente envolve iterações, pois, como citado em Lopes et al [2], a geometria deformada é desconhecida durante a formulação das relações cinemáticas e de equilíbrio, dessa forma a análise tem que ser executada de forma incremental. No entanto, o anexo D dessa norma apresenta uma metodologia simplificada para execução da análise de segunda ordem, cujo método é conhecido como método da amplificação dos esforços solicitantes (MAES), que, a partir de uma análise de primeira ordem da estrutura, possibilita obter os efeitos aproximados de segunda ordem de forma simplificada e direta.

Tendo em vista que o MAES corresponde a uma formulação analítica cujo resultado pode, dentro das

condições indicadas pela NBR 8800/2008 [1], substituir uma análise rigorosa, o objetivo deste trabalho consiste em apresentar um programa com interface gráfica desenvolvido em linguagem *Python*, para auxiliar nas comparações entre os métodos simplificados e rigorosos, facilitando assim, o estudo da análise estrutural em estruturas de aço. Para fins de comparação, é apresentado um exemplo utilizando a ferramenta desenvolvida e o software educacional *AcadFrame* para análise não linear geométrica rigorosa.

2 Método da amplificação dos esforços solicitantes (MAES)

A análise estrutural proposta na NBR 8800/2008 [1] formaliza os critérios para consideração dos efeitos de segunda ordem a depender da deslocabilidade da estrutura. Os resultados dessa análise possibilitam verificar, de forma analítica, os efeitos de segunda ordem, que são prejudiciais a resistência e estabilidade da estrutura, como expresso em Lopes et al [2].

Para a aplicação do MAES, é necessário inicialmente obter as solicitações e os deslocamentos, considerando a geometria indeformada da estrutura (análise linear elástica de primeira ordem). Os valores obtidos na análise de primeira ordem são utilizados para determinar os efeitos de segunda ordem através do cálculo de coeficientes de majoração, que incluem os chamados efeitos global (P- Δ) e local (P- δ) devidos ao deslocamento dos nós da estrutura e da não linearidade dos eixos da barra, respectivamente. Os coeficientes de majoração são denominados de coeficiente B_1 (considera o efeito P- δ) e o B_2 (que considera o efeito P- Δ).

A estratégia utilizada para determinar os esforços de segunda ordem no MAES envolve a decomposição da estrutura inicial em dois tipos de configuração, uma em que os nós são restringidos de deslocar-se lateralmente pela inserção de apoios simples – chamada de estrutura *nt* (*no translation*) - obtendo-se, então, as reações nesses apoios, e a outra, que recebe essas reações obtidas nas restrições impostas à estrutura *nt*, onde são aplicadas como ações aos respectivos nós – chamada de estrutura *lt* (*lateral translation*). Essas duas configurações são analisadas em primeira ordem e os esforços, em cada uma, são utilizadas para a determinação dos esforços de segunda ordem. A eq. (1) e (2) apresenta os coeficientes.

$$B_1 = \frac{C_m}{1 - \frac{N_{sd1}}{N_e}} \geq 1. \quad (1)$$

$$B_2 = \frac{1}{1 - \frac{1}{R_m} \cdot \frac{\Delta_h}{h} \cdot \frac{\sum N_{sd}}{\sum H_{sd}}}. \quad (2)$$

Na equação (1), o coeficiente C_m é definido conforme a existência de forças transversais entre as extremidades da barra no plano de flexão, N_{sd1} é a força axial de compressão solicitante de cálculo em análise de primeira ordem e N_e é a força normal crítica de flambagem elástica por flexão. Caso a força axial solicitante de cálculo na barra seja de tração, B_1 é unitário. Já em relação à eq. (2), R_s é um coeficiente de ajuste igual a 0.85 para estruturas apertadas e 1.00 para os demais casos. Δ_h é o deslocamento relativo entre os níveis superior e inferior de cada andar, obtido em análise de primeira ordem, e h corresponde a altura do andar considerado. $\sum N_{sd}$ é a carga gravitacional total que atua no pavimento e $\sum H_{sd}$ é a força cortante no andar, produzida pelas forças horizontais de cálculo. As eq. (3) e (4) mostram o procedimento de majoração para determinação dos esforços de segunda ordem, utilizando os coeficientes B_1 e B_2 .

$$M_{sd} = B_1 M_{nt} + B_2 M_{lt}. \quad (3)$$

$$N_{sd} = B_1 N_{nt} + B_2 N_{lt}. \quad (4)$$

Onde M_{nt} e N_{nt} são, respectivamente, o momento fletor e a força axial elástica de primeira ordem, com o impedimento para o deslocamento horizontal nos nós (estrutura *nt*). Já M_{lt} e N_{lt} consideram, por análise elástica de primeira ordem, somente o efeito do deslocamento horizontal dos nós (estrutura *lt*). Observa-se que, segundo o método MAES, a força cortante solicitante de cálculo pode ser tomada igual à da análise de primeira ordem.

A depender dos valores de B_2 , a análise da estrutura pelo MAES demanda redução da rigidez dos elementos para considerar as imperfeições de material, como mencionado em Souza [3], o que implica em reduzir em 20% a rigidez dos elementos analisados. Para $B_2 \leq 1.1$ a estrutura é classificada como de baixa deslocabilidade e para

$1.1 < B_2 \leq 1.4$, a estrutura é classificada como de média deslocabilidade sendo obrigatório considerar a redução da rigidez. Para $B_2 \geq 1.4$ a estrutura é classificada como de grande deslocabilidade e é necessária uma análise rigorosa dos efeitos de segunda ordem.

3 Metodologia

Procura-se nesta seção apresentar a implementação do método analítico simplificado MAES junto com o desenvolvimento de um programa computacional com interface gráfica. O programa foi desenvolvido utilizando as funcionalidades da linguagem *Python*, com o objetivo de facilitar a avaliação dos resultados da análise pelo MAES, pois o cálculo manual pode ser trabalhoso em estruturas complexas. Essa iniciativa permite também a comparação entre os resultados obtidos nas análises de primeira e segunda ordem de forma simples, facilitando, portanto, a avaliação do comportamento global da estrutura analisada. É discutido ainda um exemplo que consta na literatura, como também a comparação dos métodos a partir do programa desenvolvido e do software educacional *AcadFrame*.

3.1 Implementação computacional

A linguagem *Python*, segundo apresentado em Sanner [4], é interpretada, interativa e baseada no paradigma de orientação a objetos e que, portanto, permite implementações mais naturais e práticas. A principal vantagem da linguagem é devido a sintaxe simples e os recursos variados, que permite a utilização de amplas bibliotecas para diversas aplicações. Outra vantagem são as várias extensões que proporcionam integração com várias ferramentas e plataformas baseadas em outras linguagens. Neste trabalho, utiliza-se a extensão *PyQt* aliada ao software *QtDesigner* para concepção e desenvolvimento da interface gráfica.

O primeiro passo para implementação do programa de análise estrutural proposto consiste em desenvolver algoritmos para a cálculo dos esforços em primeira ordem. Para tanto, é aplicado o método da rigidez direta, que consiste na formulação matricial do método dos deslocamentos. As considerações para implementação desse método podem ser encontradas em Soriano [5].

Na Figura. 1 é apresentado o fluxograma simplificado do método MAES que apresenta os processos realizados pelo código implementado, que é baseado nos procedimentos da norma. A verificação dos resultados da implementação feita é realizada com exemplos encontrados em Souza [3] e Venturelli et al [6] havendo concordância entre os resultados, significando que a implementação está correta.

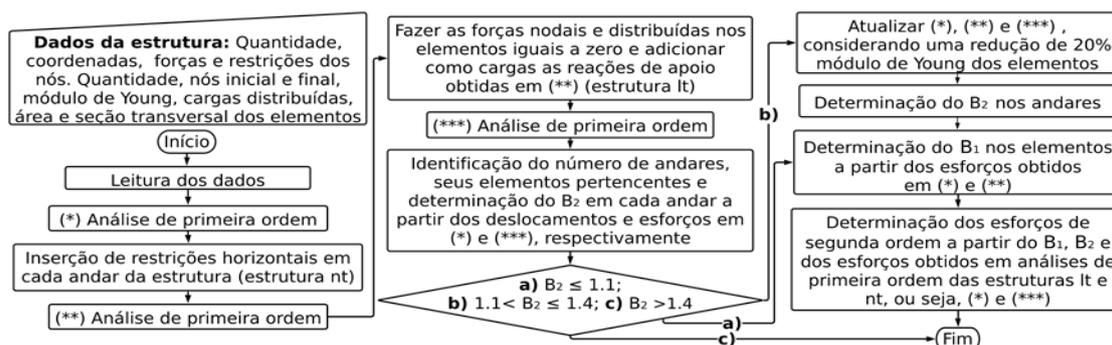


Figura 1. Fluxograma simplificado da implementação do método MAES

A interface gráfica é desenvolvida para abarcar os algoritmos de análise em primeira ordem e pelo MAES, onde, inicialmente, utiliza-se o software *QtDesigner* para concepção, empregando, em seguida, códigos em *Python*, por fim, aplicando o *PyQt* aliado aos algoritmos desenvolvidos para análise estrutural. Em sua concepção, a interface permite ao usuário inserir o número de nós do pórtico, as cargas concentradas e os momentos nodais, além da restrição do seu grau de liberdade no plano. É também possível inserir o número de elementos (barras), onde para cada um apresenta uma identificação, em que se pode definir a conectividade (nó inicial e final) de cada

elemento, as cargas distribuídas nas direções horizontal e vertical no plano, além do módulo de elasticidade, da área e do momento de inércia do perfil de aço. O programa conta com uma base de dados de perfis de aços comerciais, poupando ao usuário a inserção manual de propriedades mecânicas intrínsecas já conhecidas. O relatório pode ser gerado e armazenado no computador, onde os resultados de primeira e de segunda ordem já se encontram formatados. As informações sobre cada passo do método MAES é fornecido para facilitar a análise e estudo do método. A interface do programa pode ser visualizada na Fig. 2.

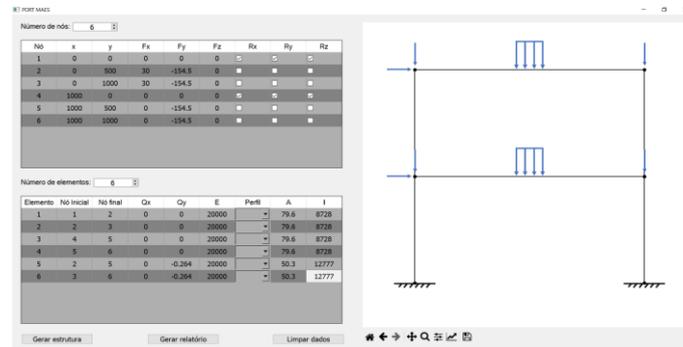


Figura 2. Interface gráfica do programa

3.2 Exemplo de aplicação

Para ilustrar a aplicação do programa desenvolvido neste trabalho foi realizada a análise de um pórtico da literatura. A Fig. 3 apresenta o pórtico analisado neste trabalho que é obtido de Venturelli et al [7]. Este pórtico é classificado como de média deslocabilidade, e, portanto, segundo a norma, a análise de segunda ordem pode ser feita pelo método MAES. Para a comparação dos resultados utiliza-se o software educacional *AcadFrame*, que permite uma análise da estrutura através do método dos elementos finitos posicionais, como referenciado em Coda e Paccola [7], sendo, portanto, uma análise de caráter rigoroso. Com essa comparação, pretende-se validar a ferramenta computacional desenvolvida e avaliar, em caso prático, os resultados fornecidos pelo MAES.

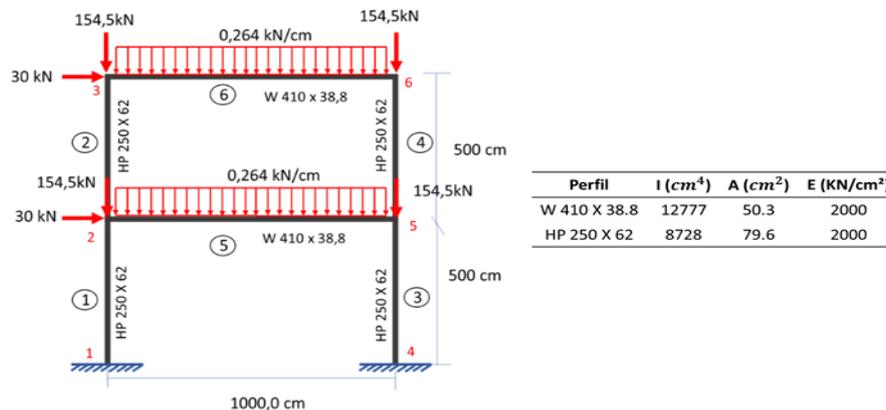


Figura 3. Pórtico analisado neste trabalho

4 Resultados

A Tabela 1 apresenta os resultados dos esforços de segunda ordem encontrados na análise do pórtico da Fig. 3. É apresentado a diferença percentual, tomando como referência os valores do método rigoroso, mostrando o quanto o resultado do programa desenvolvido se aproxima dos valores encontrados na análise rigorosa. Considera-se os esforços normais e de momento fletor, uma vez que o cortante não sofre modificações significativas pelos efeitos de segunda ordem. Os elementos 1, 2, 3 e 4 são os pilares, e os elementos 5 e 6 as vigas. A Tab. 2 apresenta os resultados dos deslocamentos por pavimento junto com a diferença percentual em relação a análise rigorosa.

Tabela 1. Comparação entre os esforços obtidos na análise rigorosa (*AcadFrame*) e MAES (programa)

Elementos	AcadFrame	Programa	Diferença	AcadFrame	Programa	Diferença
	N (kN)	N (kN)	%	M (kN.cm)	M (kN.cm)	%
1	-543,205	-541,283	-0,35	-7406,69	-8202,442	10,74
	-542,74	-541,283	-0,27	180,902	303,672	67,87
2	-276,469	-275,363	-0,40	9977,37	9707,408	-2,71
	-276,686	-275,363	-0,48	-11763,4	-11340,969	-3,59
3	-603,041	-604,717	0,28	-13864,7	-14745,817	6,35
	-602,772	-604,717	0,32	12765,6	13269,567	3,95
4	-296,514	-297,637	0,38	-16515,5	-16625,859	0,67
	-297,794	-297,637	-0,05	22226,2	22478,45	1,13
5	1,93793	29,02	93,32	-9772,08	-9639,385	-1,36
	52,2995	29,02	-44,51	-29275,4	-30165,859	3,04
6	-88,1802	-72,097	-18	-11796,2	-11991,615	1,66
	-60,1102	-72,097	19,94	-22273,2	-23136,568	3,88

Tabela 2. Comparação dos deslocamentos nos pavimentos entre o *AcadFrame* e MAES (programa)

Pavimento	<i>AcadFrame</i> (cm)	Programa (cm)	Diferença (%)
1	3.686	3.949	7.135
2	7.122	7.807	9.618

O programa desenvolvido apresenta os resultados de esforços internos e deslocamentos para a primeira e segunda ordem, e com isso o usuário pode comparar e avaliar melhor o desempenho e a ordem de grandeza dos efeitos de segunda ordem da estrutura em estudo. Na Tab. 1, as diferenças entre os resultados foram pequenas, principalmente em relação aos esforços de momento fletor que, em geral, são os mais afetados pelos efeitos de segunda ordem. Em relação aos pilares, que são as barras mais suscetíveis aos efeitos de segunda ordem, foi verificado que os resultados fornecidos pelo programa apresentaram boa concordância com os demais. As vigas também apresentaram proximidade em relação aos valores de momento fletor, entretanto, houve uma significativa diferença percentual em relação ao esforço normal no elemento 5. Na Tab.2 os deslocamentos encontrados pelo programa possuem a mesma ordem de grandeza encontrada na análise rigorosa, com diferença aceitável. Diferenças maiores encontradas podem ser explicadas devido a aproximação dos efeitos de imperfeição de material no MAES, e que não é considerada na análise do *AcadFrame* onde a análise é exclusivamente geométrica.

5 Conclusão

O método MAES apresenta boa concordância com os esforços e deslocamentos obtidos na análise rigorosa, pois, no exemplo analisado, diferenças aceitáveis foram encontradas para os esforços e deslocamentos modificados pelos efeitos de segunda ordem. O programa proposto facilita a geração dos resultados e também a comparação com os resultados da primeira ordem, dessa forma, auxilia o usuário na avaliação do comportamento da estrutura.

Referências

- [1] ABNT, NBR 8800. Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- [2] LOPES, A. P., SANTOS, G. O., SOUZA, A. L. A. C. Estudo sobre diferentes métodos de análise p-delta. Teoria e Prática na engenharia civil, p.9-19, 2005.
- [3] SOUZA, A. S. C. Dimensionamento de elementos e ligações em estruturas de aço. São Carlos, SP: EdUFSCar, 2017.
- [4] SANNER, M. F. Python: a programming language for software integration and development. J Mol Graph Model, v. 17, n. 1, p. 57-61, 1999.
- [5] SORIANO, H. L. Análise de estruturas: Formulação matricial e implementação computacional. RJ. Ciência Moderna, 2005.
- [6] VENTURELLI, F. C. V., BARROS, M. M., PALHARES, R. A. Comparison between standardized approximated and rigorous structural analysis for estimating 2nd order effects applied to steel structures. XL Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering – CILAMCE, Natal – RN, 2019.
- [7] CODA, H. B., PACCOLA, R. R. Software acadêmico para análise de pórticos e treliças planas. 2006. Disponível em < http://www.set.uesc.usp.br/software_acadframe/>. Acesso em 01 Set 2020.