
ANÁLISE DE SEGUNDA ORDEM GLOBAL EM PÓRTICOS DE AÇO DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS UTILIZANDO DIFERENTES MÉTODOS

GLOBAL SECOND-ORDER ANALYSIS OF MULTISTOREY PLANE FRAMES BY DIFFERENT METHODS

Lucas Arruda Tieni¹

Wilson Wesley Wutzow²

Elyson Andrew Pozo Liberati³

Resumo: Com a crescente busca por estruturas mais eficientes, os elementos portantes estão cada vez mais esbeltos. Com isso, a análise de segunda ordem global de edifícios se torna indispensável para a verificação da estabilidade da edificação. Diante disso, o objetivo deste trabalho consiste em avaliar os efeitos de segunda ordem em pórticos planos de aço, com múltiplos pavimentos, utilizando-se diferentes métodos aproximados: coeficiente Gama-z (γ_z); método da Amplificação dos Esforços Solicitantes ($B_1 + B_2$), proposto pela ABNT NBR 8800:2008; método da Carga Gravitacional Iterativa e o método de análise do efeito $P-\Delta$, empregando o *software* SAP2000, sendo os três primeiros calculados com o auxílio do *software* educacional TRAME 4.2. Análises de estabilidade global foram realizadas por meio de três pórticos planos de aço e os valores de momento de segunda ordem, obtidos para cada método foram comparados. Os resultados demonstraram que as análises de segunda ordem realizadas no *software* SAP2000 não apresentaram boa convergência, quando o pórtico foi avaliado com diferentes alturas entre pavimentos.

Palavras-chave: Estrutura de aço. Método da Amplificação dos Esforços. Análise $P-\Delta$. Segunda Ordem.

Abstract: *The increasing search for more efficient structures has made the supporting elements increasingly slenderer. Thus, the second-order analysis of buildings becomes indispensable for the verification of the stability of the building. The objective of this work is to evaluate the effects of second-order in multistory steel frames, using different approximate methods: Gamma-z coefficient (γ_z); method of Amplification of Requesting Efforts ($B_1 + B_2$), proposed by ABNT NBR 8800: 2008; Iterative Gravitational Load method and the $P-\Delta$ effect, employed in SAP2000 software. The first three being calculated with the aid of the TRAME 4.2 educational software. Global stability analyzes were performed using three flat steel frames and the second order moment values obtained for each method were compared. The results showed that the second-order analyzes of the SAP2000 software did not present good convergence when analyzed with different heights between floors.*

Keywords: *Steel Structures. Amplification Efforts Method. $P-\Delta$ Analysis. Second-Order.*

¹Universidade Estadual de Maringá, Campus Maringá – Brasil, e-mail: pg401040@uem.br

²Universidade Estadual de Maringá, Campus Maringá – Brasil, e-mail: wwwutzow@uem.br

³Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Apucarana – Brasil, e-mail: elyson@utfpr.edu.br

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a engenharia de estruturas passou por grandes avanços, principalmente pelo aumento da capacidade dos computadores e *softwares*, que possibilitaram a utilização de análises estruturais mais rigorosas. Além disso, foram desenvolvidos métodos que avaliam a estabilidade e os efeitos de segunda ordem em edifícios, proporcionando segurança suficiente aos projetistas para dimensionarem edifícios mais econômicos, esbeltos e arrojadados.

A complexidade relacionada aos efeitos de segunda ordem deve-se ao fato de as estruturas apresentarem comportamento não linear físico (referente a constituição dos materiais e as tensões residuais) e não linearidades geométricas (devido as forças horizontais e as imperfeições geométricas). Caso os efeitos de segunda ordem forem significativos na estrutura, deve-se realizar um estudo a partir de uma análise elástica de primeira ordem para obter estes efeitos.

Segundo Franco (1985), existem vários métodos de cálculo para a determinação desses efeitos, variando do mais simples aos mais complexo. As não linearidades são consideradas de formas diferentes em cada um deles, devendo-se escolher o método adequado para as características da obra e de sua sensibilidade aos efeitos de segunda ordem (ZUMAETA, 2016).

Um desses métodos é o γ_z (Gama-z), proposto pela ABNT NBR 6118:2014, que trata-se de um processo simplificado para a verificação da estabilidade global da estrutura e estimativa dos efeitos de segunda ordem. Esse método baseia-se na multiplicação dos esforços horizontais de primeira ordem pelo coeficiente γ_z . Fundamentado na hipótese de que as sucessivas linhas elásticas devidas à ação da carga vertical aplicada numa estrutura com os nós deslocados, se sucedem segundo uma progressão geométrica (VASCONCELOS, 2000).

Outro método muito utilizado para análise de segunda ordem é o processo $P-\Delta$, com aplicação relativamente simples, fornece estimativas satisfatórias. Há vários métodos para determinação do efeito $P-\Delta$, sendo analisado neste trabalho o Método da Carga Gravitacional Iterativa, que segundo Smith e Gaiotti (1988), é uma ferramenta simples, pois exige pouco esforço computacional e que garante resultados realistas dos efeitos $P-\Delta$. Além desse, o método iterativo empregado no *software* SAP2000 também será aplicado neste artigo.

Um terceiro processo, é o proposto pela ABNT NBR 8800:2008, Método da Amplificação dos Esforços Solicitantes (MAES), o qual também é utilizado para se obter parâmetros de estabilidade da estrutura e os efeitos de segunda ordem, o qual segundo Oliveira et al (2014), resulta em valores de esforços majorados muito semelhantes aos esforços majorados pelo método Gama-z.

É neste contexto que está inserido o presente trabalho, que se propõe a comparar o efeito de segunda ordem pelos quatro métodos citados: Gama-z, Carga Lateral Fictícia e Amplificação de Esforços Solicitantes e pelo processo $P-\Delta$ do SAP2000. Para conduzir o estudo, três pórticos planos de múltiplos pavimentos em aço. Para isto, é utilizado o *software* TRAME 4.2 na aplicação dos três primeiros, um *software* educacional livre de análise estrutural.

2 ANÁLISE DE SEGUNDA ORDEM

A verificação da estabilidade global é um requisito importante na elaboração de projetos de estruturas altas, pois tem o objetivo de garantir a segurança diante do estado limite último de instabilidade, limite que representa a perda de capacidade resistente da estrutura, devido ao aumento excessivo das deformações.

Para compreender a instabilidade que pode ocorrer nas estruturas e os efeitos de segunda ordem, é necessário o entendimento das não linearidades, que podem ocorrer em

estruturas compostas com qualquer tipo de material. Segundo Silva e Pinto (2015), existem três tipos de não linearidades na engenharia de estruturas: não linearidade geométrica (NLG), não linearidade física (NLF) e não linearidade de contato (NLC). A não linearidade de contato não será tratada neste artigo, pois se trata da alteração das condições de vínculos durante o processo de deformação da estrutura, vínculos inicialmente existentes podem desaparecer e vínculos inexistentes podem passar a existir.

A não linearidade física ou não linearidade material decorre do fato de o material não apresentar uma relação tensão-deformação linear, isto é, o comportamento do material não é elástico linear. Pode-se ter também não linearidade física nas relações momento-rotação de conexões semi-rígidas ou flexíveis, ou de rótulas inelásticas oriunda de mecanismo de colapso localizados (flambagem, plastificação ou fissuração localizadas em componentes estruturais).

Os efeitos de não linearidade geométrica são devidos aos deslocamentos da estrutura quando essa é carregada, devidos também a desaprumos oriundos da montagem da estrutura (global) e da falta de retilinearidade (local) dos elementos que compõem a estrutura.

Em análises de segunda ordem o equilíbrio é verificado considerando-se a mudança da geometria da estrutura, ou seja, são computadas as influências dos deslocamentos sobre os esforços solicitantes.

Os efeitos de segunda ordem compreendem à amplificação dos esforços solicitantes e deslocamentos devido à presença de uma força axial associada a deslocamentos laterais, provocando a curvatura da barra e rotação da corda, $P-\Delta$ e $P-\delta$, respectivamente, como representado na Figura 1.

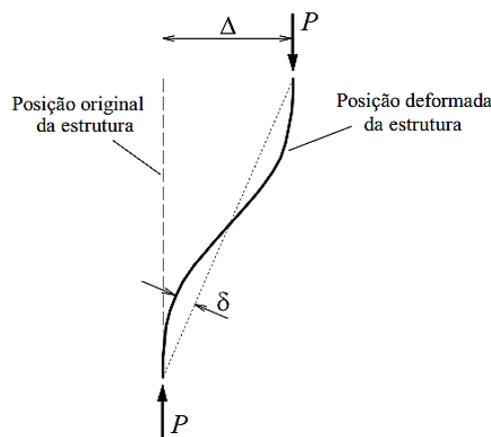


Figura 1. Efeitos Globais ($P-\Delta$) e locais ($P-\delta$)

Fonte: ASCE (1997).

2.1 Parâmetro γ_z

A ABNT NBR 6118:2014 recomenda como parâmetro de estabilidade e também como estimador de efeitos de segunda ordem globais, o coeficiente Gama-z (γ_z) para estruturas reticuladas de no mínimo quatro andares. Obtido a partir dos resultados de uma análise linear de primeira ordem para cada combinação de cálculo, dado por:

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{tot,d}}{M_{1,tot,d}}} \quad (1)$$

Nessa equação, $M_{1,tot,d}$ é o momento de tombamento, somatório dos momentos de todas as forças horizontais de cálculo em relação à base; $M_{tot,d}$ é a soma do produto das ações verticais

de cálculo da combinação considerada pelos deslocamentos horizontais, dos respectivos pontos de aplicação, obtidos em análise de linear elástica.

Para valores de $\gamma_z \leq 1,1$, classifica-se a estrutura como indeslocável ou de nós fixos, na qual, os esforços podem ser obtidos por meio de análise linear elástica. Segundo o item 15.7.2 da ABNT NBR 6118:2014, para o intervalo $1,1 \leq \gamma_z \leq 1,3$, a estrutura é classificada como de nós móveis, sendo necessário a consideração das não linearidade geométricas, que pode ser realizada pela simples multiplicação de $0,95\gamma_z$ obtido, pelos esforços horizontais de primeira ordem.

Zumaeta (2016) conclui que se os esforços horizontais fossem multiplicados pelo valor integral de γ_z ao em vez de $0,95\gamma_z$, os valores estimados do efeito de segunda ordem seriam mais próximos dos valores reais, no caso de estruturas de concreto armado. Para valores de $\gamma_z > 1,3$, a estrutura deve ser analisada por métodos mais rigorosos, como o processo $P-\Delta$.

2.2. Método da Amplificação dos Esforços

O método de amplificação de esforços é uma ferramenta de análise aproximada dos efeitos de segunda ordem de estruturas. Por meio da multiplicação por coeficientes que consideram os efeitos de segunda ordem globais ($P-\Delta$) e locais ($P-\delta$), pelos esforços de primeira ordem, obtido por análise elástica da estrutura. O método está presente na ABNT NBR 8800:2008, que é o define:

$$M_{Sd} = B_1 M_{nt} + B_2 M_{1t} \quad (2)$$

Duas análises de primeira ordem são necessárias para o cálculo das parcelas M_{nt} e M_{1t} (Figura 2). O parâmetro M_{nt} refere-se ao momento solicitante de cálculo assumindo não existir deslocamento lateral da estrutura, obtido por análise elástica de primeira ordem, com os nós da estrutura impedidos de se deslocar horizontalmente. Enquanto que M_{1t} , é o momento fletor solicitante de cálculo, obtido por análise elástica de primeira ordem, correspondente apenas ao efeito dos deslocamentos horizontais dos nós da estrutura provocados pela aplicação, em sentido contrário, das reações das contenções fictícias, nos mesmos pontos onde foram colocadas.

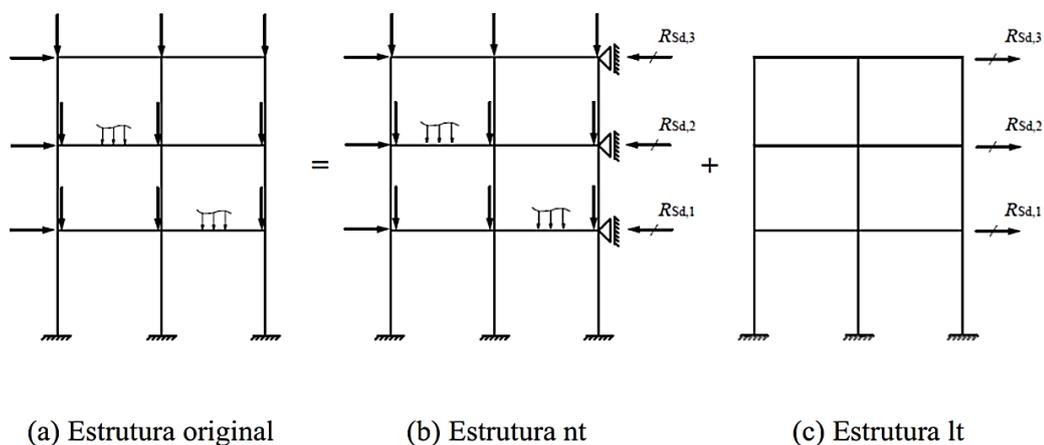


Figura 2. Modelo para análise

Fonte: ABNT NBR 8800 (2008).

O termo B_1 presente da Equação (2) é o coeficiente de amplificação devido ao efeito $P-\delta$ dado pela Equação (3).

$$B_1 = \frac{C_m}{1 - \frac{N_{Sd}}{N_e}} \quad (3)$$

Nessa equação, N_{Sd} é a força normal solicitante de cálculo; N_e é a força normal crítica de flambagem da barra, calculado com comprimento efetivo de flambagem para uma estrutura indeslocável ($K \leq 1$), ou seja, cujos nós de extremidade são impedidos de deslocarem e C_m é um coeficiente determinado mediante duas condições.

A primeira condição ocorre caso não houverem forças transversais entre as extremidades da barra no plano de flexão, e a mesma seja submetida a momentos aplicados nas extremidades e uma força axial de compressão:

$$C_m = 0,6 - 0,4 \frac{M_1}{M_2} \quad (4)$$

onde, M_1/M_2 é a relação entre o menor e o maior momento fletor nas extremidades da barra que deve ser tomado positivo quando os momentos provocarem curvatura reversa e negativo quando os momentos provocarem curvatura simples.

Já a segunda condição ocorre se houverem forças transversais entre as extremidades da barra no plano de flexão ou se a força axial solicitante no cálculo for tração, o valor de C_m deve ser determinado por análise racional ou ser tomado conservadoramente igual a 1,0. O parâmetro B_2 é o coeficiente de amplificação devido ao efeito P- Δ , dado pela seguinte expressão:

$$B_2 = \frac{1}{1 - \frac{1}{R_m} \frac{\Delta_h}{h} \frac{\sum N_{Sd}}{\sum H_{Sd}}} \quad (5)$$

em que, $\sum N_{Sd}$ é o somatório da força normal de cálculo nos pilares do andar considerado; $\sum H_{Sd}$ é a cortante no andar considerado produzida pelas forças horizontais de cálculo; Δ_h é o deslocamento relativo entre os níveis superior e inferior de cada andar obtido em análise linear elástica; h é a altura do pavimento e R_m é um coeficiente de ajuste com valor igual a 0,85 para estruturas aporticadas e 1,00 para os demais casos.

O coeficiente B_2 é um parâmetro para medir a deslocabilidade da estrutura, pois está relacionado à instabilidade do pórtico e possui um valor para cada andar da estrutura. Segundo Ormonde (2013), quando o valor de B_2 não ultrapassa o valor de 1,1, em todos os andares, a estrutura é classificada como de pequena deslocabilidade, se o valor estiver entre 1,10 e 1,40 em pelo menos um dos andares a estrutura é classificada como média deslocabilidade e, grande deslocabilidade, quando maior que 1,40.

Pela ABNT NBR 8800:2008, para estruturas de pequena deslocabilidade não é necessário considerar os efeitos de segunda ordem, porém, devem ser considerados os efeitos das imperfeições geométricas iniciais, por meio da aplicação de uma força horizontal equivalente em cada andar, denominada de força nocional, igual a 0,3% do valor de todas as cargas gravitacionais do pavimento considerado. A força nocional deve ser aplicada na combinação de carga em que não são consideradas outras forças horizontais (vento) ou quando não há carregamentos horizontais, a carga nocional deve ser aplicada como carregamento horizontal mínimo.

Quando as estruturas são classificadas em média ou grande deslocabilidade, é necessário considerar os efeitos das imperfeições dos materiais, reduzindo os valores da rigidez à flexão e rigidez axial das barras em 80%. Em estruturas de grande deslocabilidade deve ser realizada uma análise rigorosa considerando todas as não linearidades, físicas ou geométricas.

2.3. Efeito $P-\Delta$

Quando cargas horizontais agem em um edifício, provocam deslocamentos laterais e momentos na base do edifício, estes são os efeitos de primeira ordem. Porém, estes deslocamentos laterais, provocam excentricidade nas cargas gravitacionais, que por sua vez geram mais deslocamentos laterais e momentos na base, que se somam aos momentos de primeira ordem. Estes são os efeitos de segunda ordem, chamados de efeito $P-\Delta$ (LEAL e CAMPELLO, 2013).

Em estruturas de pouca esbelteza, os efeitos $P-\Delta$ são pequenos o suficiente para serem desconsiderados, porém, em edifícios altos e muito esbeltos, os efeitos $P-\Delta$ se tornam significantes. Em muitos casos, em que há grandes cargas gravitacionais, se estes efeitos não forem considerados com o dimensionamento de elementos mais robustos, toda estrutura pode vir ao colapso (GAIOTTI e SMITH, 1989).

Na literatura, há vários métodos de estimativa de efeitos de segunda ordem que levam em conta o efeito $P-\Delta$, que nada mais são do que processos de análise não-linear geométrica, tais como: Método de Dois Ciclos Iterativos, Método da Carga Lateral Fictícia, Método da Carga de Gravidade Iterativa e Método da Rigidez Negativa (ZUMAETA, 2016).

Um dos métodos mais utilizados é o método da Carga Lateral Fictícia Iterativa, em que, após análise elástica de primeira ordem, é obtido o momento de segunda ordem ($P\Delta$), que é substituído por uma carga lateral fictícia, uma força horizontal que multiplicada pela altura da estrutura, resulta em um momento na base igual ao momento de segunda ordem. Então, é realizado um processo iterativo, pois a cada aplicação da carga fictícia ocorre um deslocamento maior que o deslocamento da iteração anterior e, portanto, um novo momento de segunda ordem, conforme Figura 3. A iteração é realizada até que a diferença de deslocamentos laterais entre uma iteração e outra seja aproxime de zero.

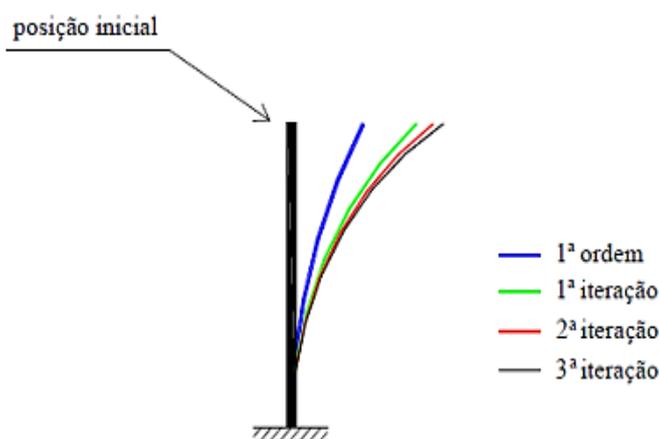


Figura 3. Iterações do processo $P-\Delta$

Fonte: Lima *apud* Zumaeta (2016).

Neste trabalho será utilizado o método da Carga Gravitacional Iterativa, pois segundo Gaiotti e Smith (1989), é um método que exige menor esforço computacional e mais realista do que o método da Carga Lateral Fictícia. De acordo com Ormonde (2013), o método da Carga Gravitacional Iterativa não altera o real valor dos esforços cortantes na estrutura e reações de apoio.

O processo inicia-se com uma análise de primeira ordem com as cargas horizontais aplicadas na estrutura. Num segundo passo, aplicam-se as cargas gravitacionais sobre a estrutura na sua condição deslocada, obtendo-se os incrementos de deslocamento.

Posteriormente realizam-se sucessivas análises sobre os incrementos de deslocamento das respectivas análises anteriores, até que os incrementos de deslocamento atinjam valores desprezíveis (convergência da análise). Os deslocamentos e esforços finais são obtidos pela simples soma dos deslocamentos e esforços da análise inicial com os deslocamentos e esforços das análises subsequentes.

2.4. Softwares de análises

O *software* TRAME, versão 4.2.1, utilizado neste trabalho, é um *programa* educacional livre, resultado do trabalho de mestrado do Prof. Paulo C. Ormonde, no qual o foi devidamente validado. Esse programa possibilita a análise elástica linear de pórticos planos por meio da abordagem matricial do Método dos Deslocamentos.

É possível calcular no *software* os parâmetros de estabilidade Gama-z (ABNT NBR6118:2014) e também o parâmetro B_2 (ABNT NBR 8800:2008) em uma análise elástica de primeira ordem. O usuário tem a opção de considerar a não-linearidade geométrica $P-\Delta$, por meio do Método de Carga de Gravidade Iterativa, de Smith e Gaiotti (1988) e também pode obter os esforços de segunda ordem pelo Método da Amplificação dos Esforços ($B_1 + B_2$). Assim, os parâmetros de estabilidade e os métodos para obter esforços de segunda ordem podem ser comparados.

O *software* SAP2000, é um programa computacional comercial de análise estrutural baseado em elementos finitos. Por meio dele, há a possibilidade de se obter os efeitos $P-\Delta$, porém no manual do usuário do *software*, não fica claro qual o método utilizado para isto, sendo indicado apenas que é necessário realizar uma análise iterativa para determinar as forças axiais provenientes do efeito $P-\Delta$ em estruturas reticuladas. As forças axiais são estimadas mediante uma análise preliminar da estrutura. Considerando essas forças, são resolvidas novamente as equações de equilíbrio. Este processo pode criar variações nas forças axiais. Devem-se realizar iterações adicionais até que as forças axiais e as deflexões laterais converjam, atendendo a uma tolerância preestabelecida. O procedimento está baseado na utilização da matriz de rigidez geométrica. O SAP2000 pode analisar os efeitos $P-\Delta$ e $P-\delta$, porém, é recomendável fazer a análise do efeito $P-\Delta$ na estrutura, e usar fatores majoradores de momentos para determinar os efeitos $P-\delta$ nos elementos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho são analisados três pórticos planos com múltiplos pavimentos, a fim de analisar os efeitos de segunda ordem e comparar os valores obtidos pelos diferentes métodos. O único propósito destes é mostrar como os esforços de segunda ordem são considerados na base dos pilares. Os carregamentos horizontais e verticais são aleatórios, com o intuito de se obter valores elevados dos efeitos de segunda ordem. Para isto, também foram adotados perfis de tamanhos reduzidos.

Com o auxílio do *software* TRAME, foram verificados, inicialmente, os parâmetros de estabilidade γ_z e B_2 em uma análise elástica, considerando apenas os efeitos das imperfeições geométricas, por meio da aplicação das forças nocionais iguais 0,3% da carga vertical atuando sobre cada pavimento. Os parâmetros são obtidos para as combinações últimas de ações e então são realizadas as determinações dos momentos de segunda ordem nas bases dos pilares. Nas estruturas classificadas como deslocáveis, a rigidez a flexão e axial é reduzida para 80% pela redução do módulo de elasticidade.

São comparados os valores de momentos de segunda ordem obtidos pela multiplicação dos esforços horizontais por $0,95\gamma_z$ e pelo valor integral de γ_z em uma análise elástica. Após isto, é feita análise de segunda ordem pelo Método da Amplificação dos Esforços e Método da Carga Gravitacional Iterativa ainda no *software* TRAME. Em seguida, é realizada a análise $P-\Delta$ utilizando-se o *software* SAP2000.

3.1. Combinações de ações

Para verificação da segurança em relação os limites últimos, foram utilizadas as seguintes combinações últimas normais:

- Combinação 1: $N_d = 1,4PP + F_n + 1,5PQ$
- Combinação 2: $N_d = 1,4PP + 1,4W + (1,5)(0,5)PQ$
- Combinação 3: $N_d = 1,4PP + 1,5PQ + (1,4)(0,6)W$

onde,

PP – Peso próprio da estrutura;

PQ – Sobrecarga de utilização;

W – Carga de vento;

F_n – Força horizontal equivalente (Força nocional).

A Combinação 1, leva em consideração a recomendação da ABNT NBR 8800:2008, em que a força nocional deve ser analisada em uma combinação em que seja a única força horizontal, para assim representar as imperfeições geométricas da estrutura.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Pórtico 1

Esse exemplo trata-se de uma estrutura reticulada rígida de 8 pavimentos que compõe a estrutura de um edifício em aço. A Figura 4 mostra as dimensões e os carregamentos da estrutura, peso próprio (PP), sobrecarga (PQ) e vento (W). Admite-se que os pilares são engastados na base e que existe continuidade completa nas vigas. Foram adotados perfil W410x38,8 nos pilares e perfil W360x57,8 nas vigas.

A força nocional (F_n), que representa as imperfeições geométricas pode ser estimada como:

$$F_n = 0,003[(30 + 30 + 60,25)1,4 + (20 + 20 + 39,38)1,5 + 14(9,1)1,4 + ((7,52)6 + (5,64)8)1,5]$$

$$F_n = 1,80 \text{ kN}$$

Após análise de primeira ordem foram obtidos os coeficientes γ_z e B_2 , detalhados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de estabilidade obtidos em análise elástica

	γ_z	B_2
COMB1	1,233	1,263
COMB2	1,129	1,102
COMB3	1,171	1,100

Pelo coeficiente Gama-z, a estrutura é classificada como nós móveis. Já com base no B_2 , essa é classificada como média deslocabilidade. Nas Figuras 5, 6 e 7 estão apresentados os momentos fletores na base dos três pilares do pórtico obtidos em cada método. Os gráficos mostram os esforços de primeira ordem para que seja possível comparar com os valores de segunda ordem e a série indicada por $0,95\gamma_z$, representa os momentos obtidos pela multiplicação dos esforços horizontais pelo valor de $0,95\gamma_z$ de cada combinação, enquanto a série γ_z representa os momentos obtidos pela multiplicação do valor integral de γ_z .

As médias das diferenças relativas entre os métodos estudados estão apresentadas na Tabela 2. Nessa tabela, o método da Carga Gravitacional Iterativa obtido por meio do programa TRAME é identificado como $P-\Delta$.

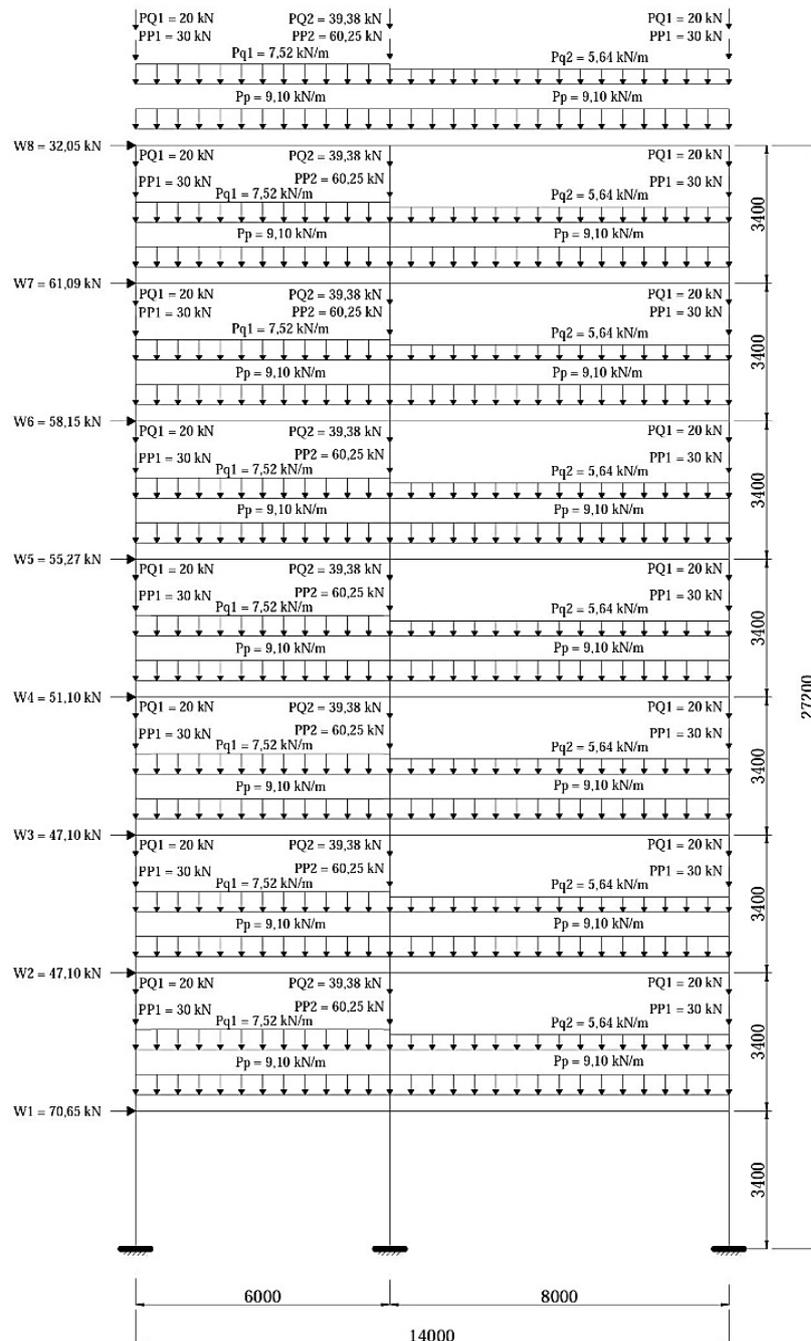


Figura 4. Carregamento e pilares 1, 2 e 3, da esquerda para direita

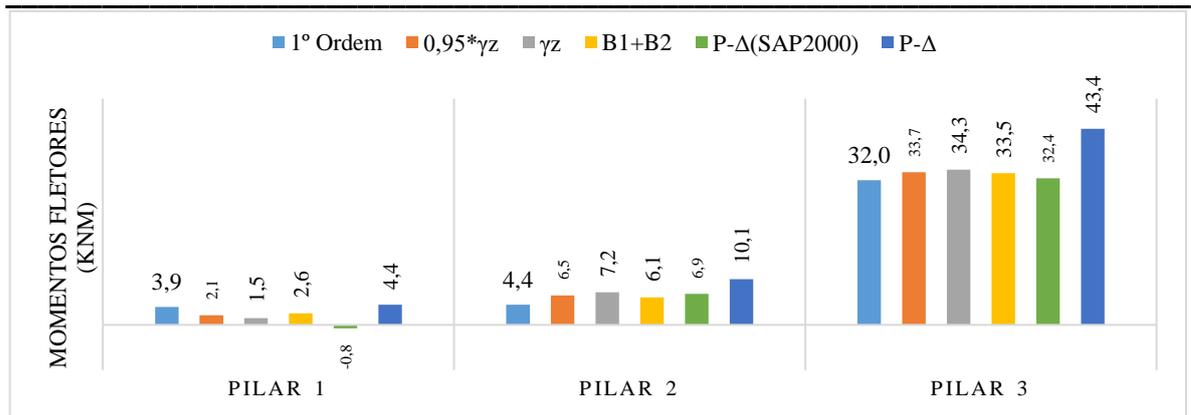


Figura 5. Momentos na base dos pilares resultantes da Combinação 1

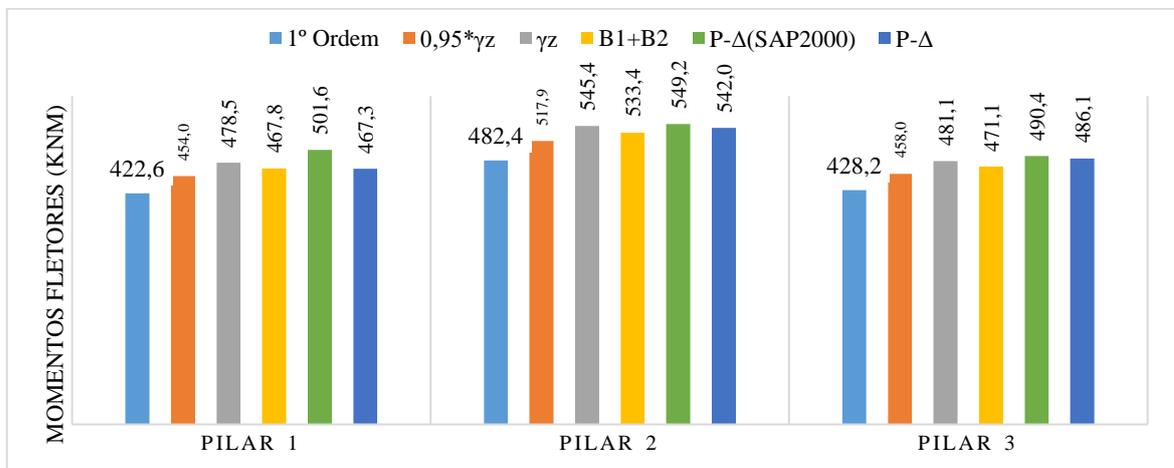


Figura 6. Momentos na base dos pilares resultantes da Combinação 2

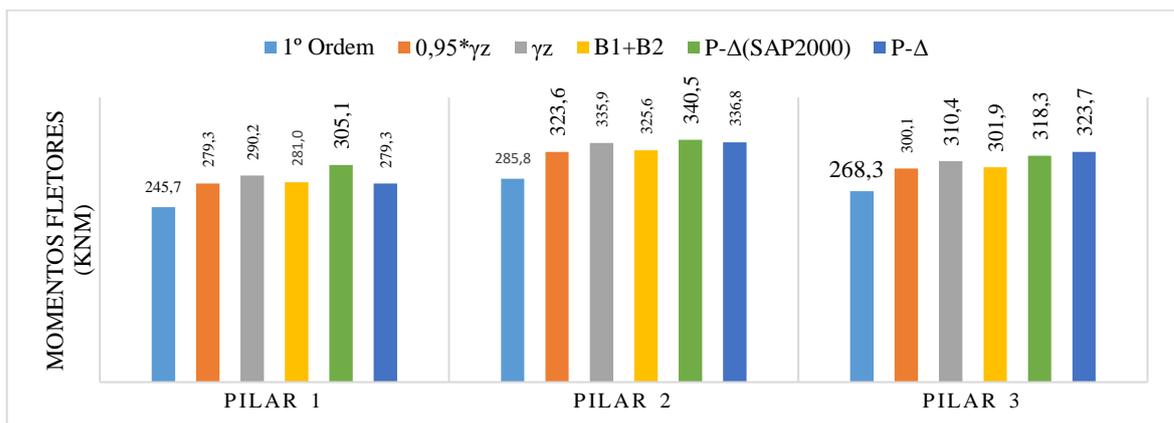


Figura 7. Momentos na base dos pilares resultantes da Combinação 3

Tabela 2. Diferença percentual entre os valores de momentos na base em relação ao Método da Carga Gravitacional Iterativa

	1º Ordem	0,95 * γ_z	γ_z	B1 + B2	P- Δ (SAP2000)
	P- Δ	P- Δ	P- Δ	P- Δ	P- Δ
COMB1	31,07%	36,62%	38,60%	34,71%	58,20%
COMB2	10,84%	4,36%	-0,67%	1,53%	2,59%
COMB3	14,76%	3,73%	0,15%	3,15%	-2,89%

A partir da Tabela 2 verifica-se que as diferenças entre os métodos são superiores para Combinação 1 do que nas outras combinações, sendo essa a combinação com menor carga lateral e a combinação com maiores valores dos parâmetros γ_z e B_2 , ou seja, mais deslocável que nas Combinações 2 e 3.

Os valores negativos representam que os momentos do método são maiores que os momentos do Método da Carga Gravitacional Iterativa. É possível perceber também na tabela, que no pórtico analisado, os momentos obtidos por γ_z , são mais próximos dos valores obtidos pelo Método da Carga Gravitacional Iterativa do que os momentos obtidos por $0,95\gamma_z$, assim como constatou Zumaeta (2016) para estruturas de concreto armado. Nas Combinações 2 e 3, todos os métodos alcançaram boa estimativa dos momentos de segunda ordem, sendo menor do que 5% a diferença.

4.2. Pórtico 2

O pórtico 2 (Figura 8), possui dois vãos de 5 metros, 10 pavimentos, sendo o segundo pavimento com pé direito de 5 metros e os pavimentos restantes com pé direito de 3,4 metros.

Em relação as cargas atuantes no pórtico, os valores de PP e PQ , tanto para as cargas concentradas, quanto para cargas distribuídas, são iguais ao primeiro exemplo deste artigo. Diferem do pórtico 1 as cargas de vento no primeiro e segundo pavimentos, devido ao aumento da área pelo pé direito mais alto e aplicadas as cargas de vento do nono e décimo andar. Admite-se que os pilares são engastados na base e que existe continuidade completa nas vigas.

Os perfis adotados são de seção reduzida, a fim de compor uma estrutura de nós móveis. Os perfis utilizados são $W360 \times 51$ nos pilares do primeiro ao quinto pavimento, perfil $W310 \times 52$ do sexto ao décimo pavimento e perfil $W310 \times 38,7$ em todas as vigas do pórtico.

A força horizontal equivalente (F_n) a ser aplicada em cada pavimento da estrutura é igual a 0,3% da somatória da combinação de todas as cargas gravitacionais de cada pavimento. Como as cargas gravitacionais dos dez pavimentos são idênticas, tem-se:

$$F_n = 0,003[(30 + 30 + 60,25)1,4 + (20 + 20 + 39,38)1,5 + 10(9,1)1,4 + ((7,52)5 + (5,64)5)1,5]$$

$$F_n = 1,51 \text{ kN}$$

Após análise de primeira ordem foram obtidos os coeficientes γ_z e B_2 , detalhados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros de estabilidade obtidos em análise elástica

	γ_z	B_2
COMB1	1,273	1,189
COMB2	1,219	1,141
COMB3	1,294	1,186

Pelo parâmetro γ_z o pórtico é classificado como de média deslocabilidade e pelo parâmetro B_2 o pórtico é classificado como média deslocabilidade em todos os pilares. Nas Figuras 11 a 13 estão expressos os valores de momentos nas bases dos três pilares do pórtico para cada método de obtenção de esforços de segunda ordem.

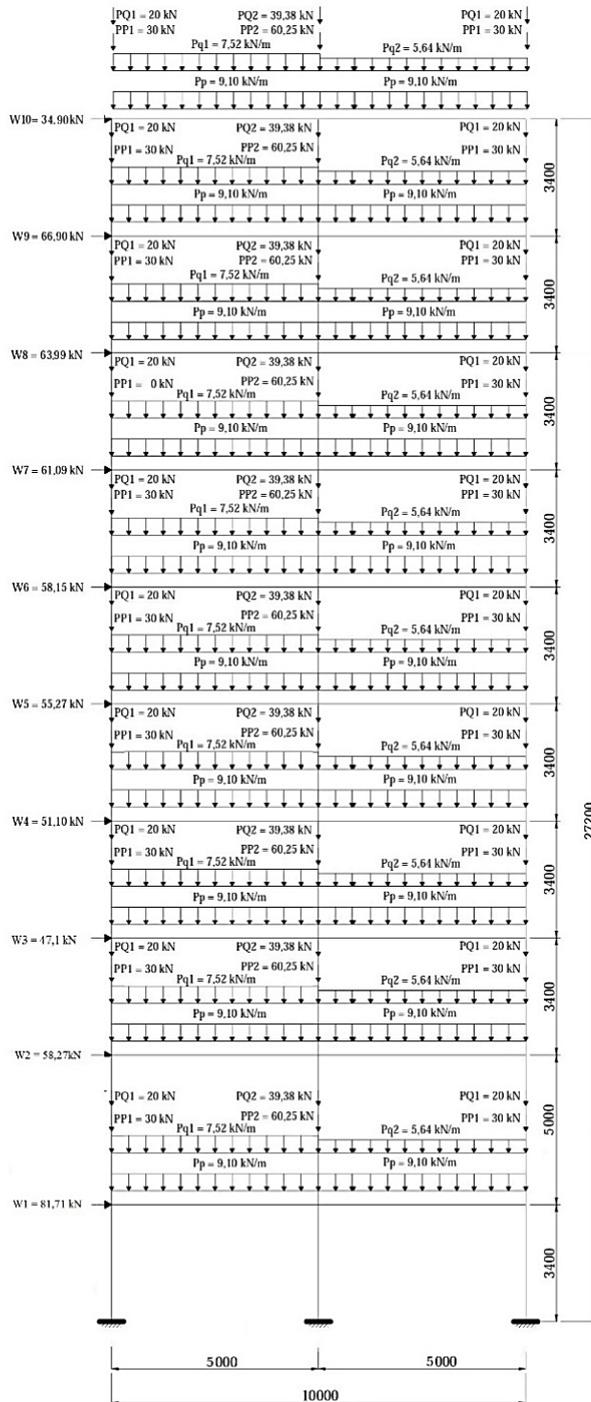


Figura 8. Pórtico 2 com segundo pavimento com altura entre pavimentos maior

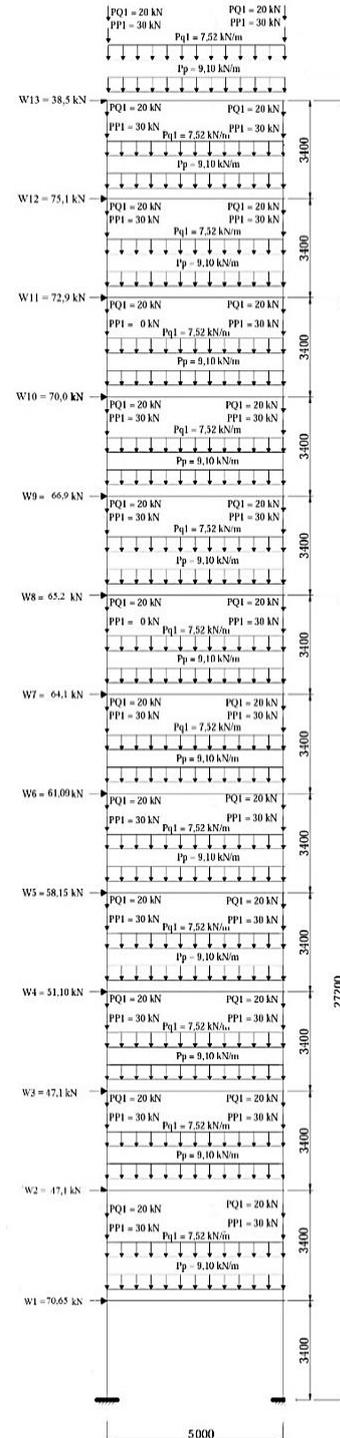


Figura 9. Pórtico 3 com um vão e 13 pavimentos

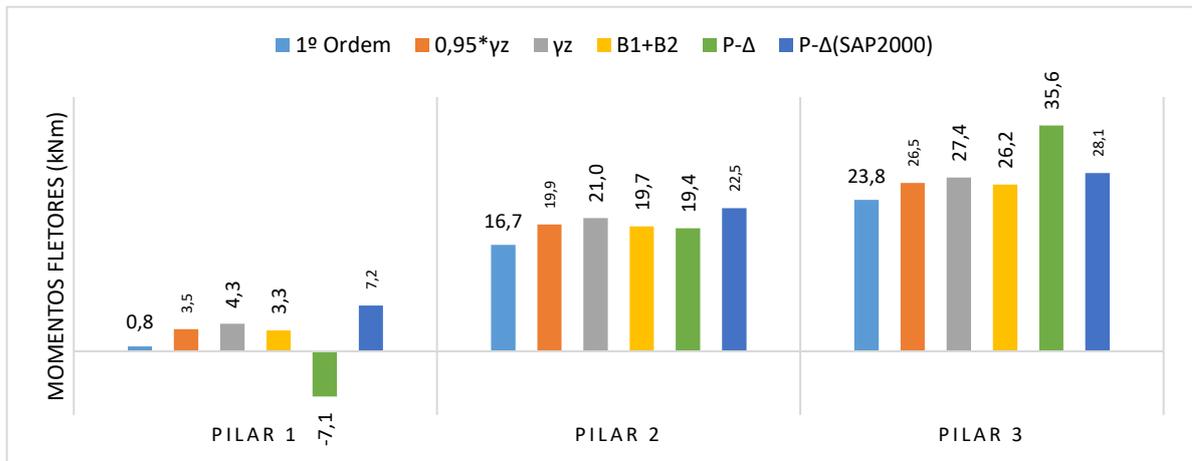


Figura 10. Momentos na base dos pilares resultantes da Combinação 1

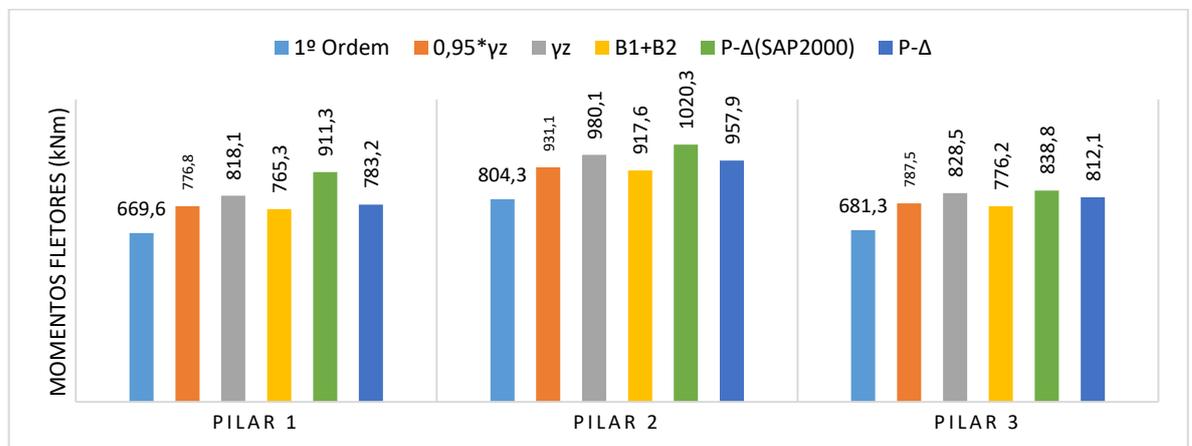


Figura 11. Momentos na base dos pilares resultantes da Combinação 2

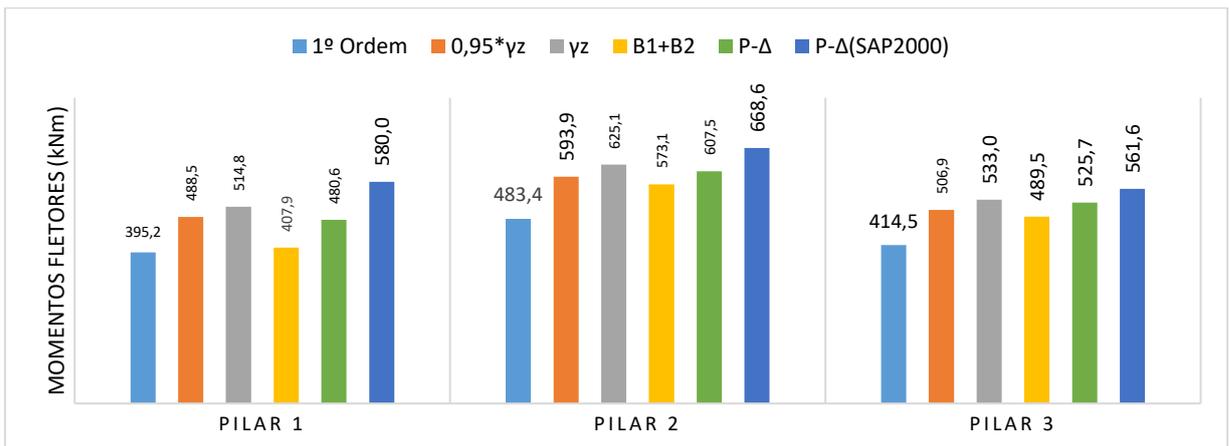


Figura 12. Momentos na base dos pilares resultantes da Combinação 3

Por meio das Figuras 10 a 12, observa-se que os valores do Método B_1 e B_2 ficaram abaixo dos demais métodos e em alguns valores, próximo dos momentos de 1º ordem. As médias das diferenças relativas entre os métodos estudados estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Diferença porcentual entre os valores de momentos na base em relação ao Método da Carga Gravitacional Iterativa.

	$\frac{1^{\circ} \text{ Ordem}}{P-\Delta}$	$\frac{0,95 * \gamma_z}{P-\Delta}$	$\frac{\gamma_z}{P-\Delta}$	$\frac{B_1 + B_2}{P-\Delta}$	$\frac{P-\Delta (SAP2000)}{P-\Delta}$
COMB1	52,60%	57,23%	58,70%	56,95%	68,75%
COMB2	15,55%	2,22%	-2,93%	3,64%	-8,71%
COMB3	19,79%	1,39%	-3,80%	9,22%	-12,52%

A partir da Tabela 4, constata-se que diferentemente do pórtico 1, a aproximação pela multiplicação dos esforços por $0,95\gamma_z$ apresentou valores mais próximos do que pela multiplicação do valor γ_z integral em todas as combinações e ambos se aproximaram mais do Método da Carga Gravitacional do que o Método $B_1 + B_2$ e $P-\Delta$ calculado pelo SAP2000. Vale ressaltar a diferença de valores obtidos entre os dois métodos $P-\Delta$ utilizados, sendo os dois métodos iterativos, porém, calculados por *softwares* diferentes.

4.3. Pórtico 3

O pórtico 3, apresentado na Figura 9, possui um vão de 5 metros, 13 pavimentos, todos os pavimentos com altura de 3,4 metros.

Em relação as cargas atuantes no pórtico, os valores são $PP = 9,1$ kN/m distribuído em todos os pavimentos e $PP_I = 30$ kN concentrado nos dois nós de cada pavimento. A sobrecarga é $PQ = 7,52$ kN/m distribuído em cada pavimento e $PQ_I = 20$ kN concentrado nos nós de cada pavimento. As cargas de vento são iguais ao pórtico 2, acrescida das cargas dos pavimentos 11, 12 e 13, $W_{11} = 72,9$, $W_{12} = 75,1$ e $W_{13} = 38,5$, respectivamente.

Admite-se que os pilares são engastados na base e que existe continuidade completa nas vigas. Os perfis utilizados são W410x85 nos pilares do primeiro ao sétimo pavimento, perfil W360x72 do oitavo ao décimo terceiro pavimento e perfil W360x44 em todas as vigas do pórtico. A força nocional é igual a:

$$F_n = 0,003[(30 + 30)1,4 + (20 + 20)1,5 + 5(9,1)1,4 + 5(7,52)1,5]$$

$$F_n = 0,79 \text{ kN}$$

Após análise de primeira ordem foram obtidos os coeficientes γ_z e B_2 , detalhados na Tabela 5. Na Figura 13 estão expressos os valores de momentos nas bases dos três pilares do pórtico para cada método de obtenção de esforços de segunda ordem.

Tabela 5. Parâmetros de estabilidade obtidos em análise elástica.

	γ_z	B_2
COMB1	1,189	1,133
COMB2	1,139	1,10
COMB3	1,186	1,132

Com base na Tabela 5, verifica-se que pelo parâmetro γ_z , o pórtico é classificado como de média deslocabilidade e pelo parâmetro B_2 o pórtico é classificado como média deslocabilidade em todos os pilares. As médias das diferenças relativas entre os métodos estudados estão apresentadas na Tabela 6.

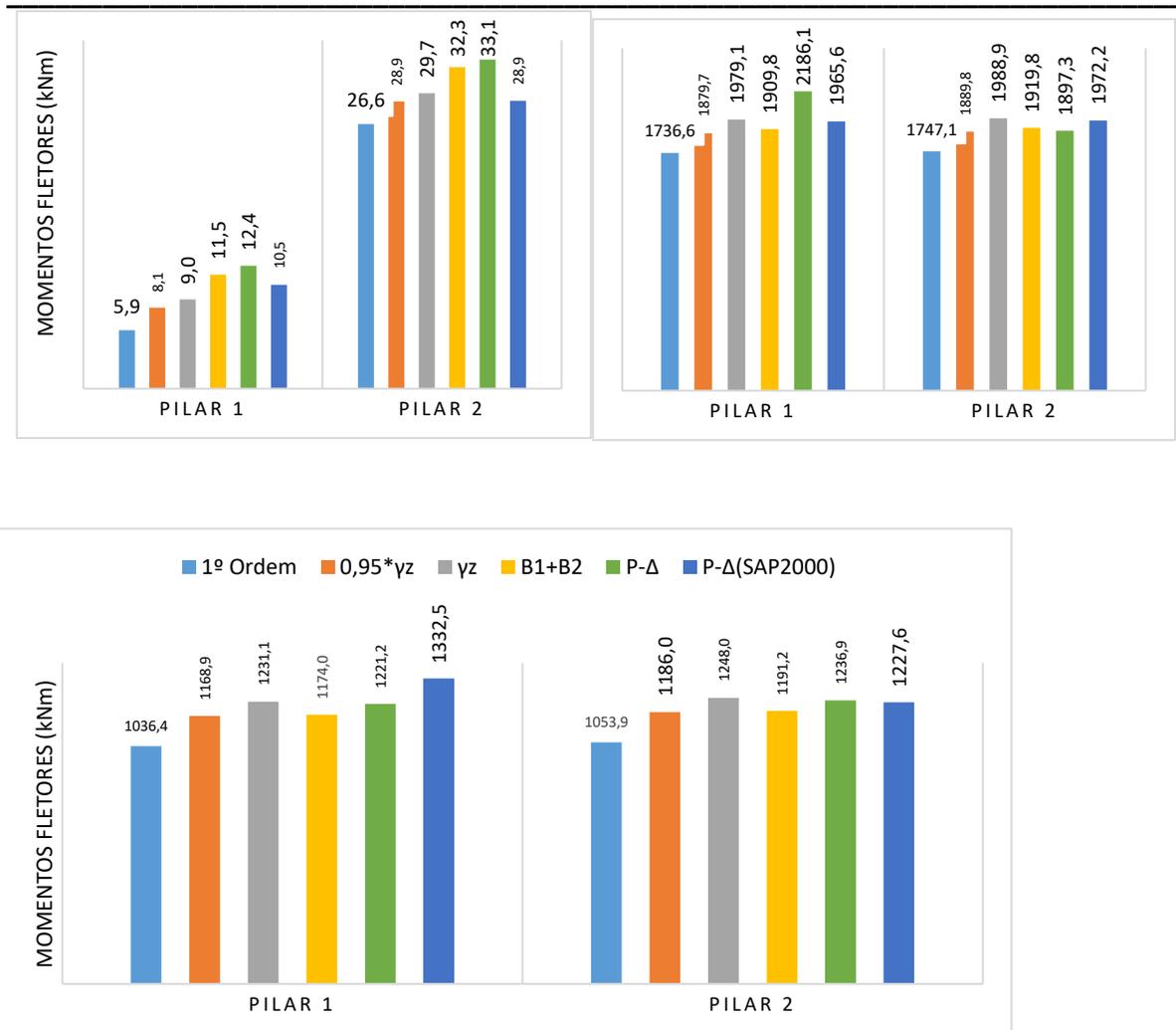


Figura 13. Momentos na base dos pilares resultantes das Combinações 1, 2 e 3, respectivamente, da esquerda para a direita

Tabela 6. Diferença porcentual entre os valores de momentos na base em relação ao Método da Carga Gravitacional Iterativa

	$\frac{1^\circ \text{ Ordem}}{P-\Delta}$	$\frac{0,95 * \gamma_z}{P-\Delta}$	$\frac{\gamma_z}{P-\Delta}$	$\frac{B1 + B2}{P-\Delta}$	$\frac{P-\Delta (SAP2000)}{P-\Delta}$
COMB1	36,02%	23,47%	18,87%	4,73%	13,95%
COMB2	11,53%	4,27%	-0,77%	2,75%	-3,71%
COMB3	14,96%	4,20%	-0,85%	3,78%	-4,19%

A partir dos resultados obtidos para o terceiro exemplo estudado, percebe-se que os momentos de segunda ordem obtidos por multiplicação do valor integral de γ_z , ficaram mais próximos dos valores do método da carga gravitacional iterativa, do que os valores da multiplicação por $0,95\gamma_z$.

Para as Combinações 2 e 3, os valores do método do $B_1 + B_2$ e do SAP2000, se aproximaram dos valores do método da carga gravitacional, sendo menor do que 5% a diferença.

5. CONCLUSÕES

Em estruturas esbeltas classificadas como de nós móveis, é indispensável a análise dos efeitos de segunda ordem, que se forem ignorados podem levar a estrutura a colapso. Neste trabalho, analisou-se e comparou-se diferentes métodos de obtenção de esforços de segunda ordem em pórticos planos de múltiplos pavimentos em estrutura metálica. Para atingir os objetivos propostos foram analisados três pórticos planos, primeiramente classificando-os quanto a estabilidade pelos coeficientes γ_z e B_2 . Em seguida, os momentos de segunda ordem na base dos pilares foram estimados por meio do método de multiplicação dos esforços laterais por $0,95\gamma_z$ e pelo valor integral de γ_z . Os pórticos ainda foram analisados por meio dos seguintes métodos: Amplificação dos Esforços, Amplificação dos Esforços Laterais e $P-\Delta$.

Nós pórticos 1 e 3, os valores de momentos obtidos por $0,95\gamma_z$ apresentaram menor aproximação aos valores do método da carga gravitacional, do que os momentos do conseguidos na multiplicação integral de γ_z .

Observou-se que no pórtico 2, onde há um pavimento com pé duplo, os valores de $B_1 + B_2$ e do SAP2000, apresentaram maior diferença em relação aos métodos da carga gravitacional. Sendo que nos pórticos 2 e 3 estes apresentam boa aproximação.

Os resultados obtidos não foram comparados com resultados de outros trabalhos. No entanto, nota-se que os valores obtidos pelos métodos $P-\Delta$, induzem a cargas mais elevadas por consequência ao dimensionamento de estruturas com maiores dimensões, se comparado ao método normativo MAES, que leva em consideração os efeitos de segunda ordem e no entanto resultam em estruturas mais delgadas e mais econômicas. É importante destacar que as conclusões não são gerais e valem apenas para os pórticos planos de aço estudados neste artigo. Nem qual método apresentado seria aquele que reproduz mais fielmente o comportamento real das estruturas, sendo necessário para isto, a comparação destes com métodos rigorosos de cálculo que consideram as especificidades de cada estrutura.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Effective Length and Notional Load Approaches for Assessing Frame Stability: implication for American steel design**. Editora The Society, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de Estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2008.

CSI COMPUTERS AND STRUCTURES. **SAP2000 Analysis reference manual**. Inc., Berkeley, CA, p. 409-420, 2016.

GAIOTTI, R.; SMITH, B.S. Iterative gravity method for $P-\Delta$ analysis. **Structural Engineering Series Report**, n 88-4, junho, 1988.

GAIOTTI, R.; SMITH, B.S. $P-\Delta$ analysis of building structures. **Journal of Structural Engineering**, v. 115, n. 4, p. 755-770, 1989.

LEAL, L. A. A.; CAMPELLO, E. M. B. Análise elástica dos efeitos da deslocabilidade global em estruturas de aço. CBCA. **Revista da Estrutura de Aço**. v. 02, n.2, 75-94. Agosto, 2013.

OLIVEIRA, D. M.; SILVA N. A.; OLIVEIRA P.M.; RIBEIRO, C. C. Avaliação dos momentos de segunda ordem em estruturas de concreto armado utilizando os coeficientes γ_z e B_2 . **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 7, n.3, p 329-348, Junho, 2014.

ORMONDE, P. C. Software educacional livre para análise não linear de pórticos em estruturas metálicas. **Revista Construção Metálica**. Ed. 117, p. 34-39. Junho, 2015.

SILVA, V. P.; PINTO, S. L. Determinação dos esforços solicitante em barras de pórtico plano, considerando-se a não linearidade geométrica por meio de um método simplificado. **Revista da Estrutura de aço** (CBCA), v. 4, n.2, p 114-133, agosto, 2015.

ZUMAETA, W.J.M. **Análise da Estabilidade de Edifícios com Estrutura de Concreto Armado**. Editora WI, 1º Edição, 2016.