

Análise dos Efeitos de Segunda Ordem em Edifícios de Diferentes Pavimentos pelos Processos P-Delta e Coeficiente Gama-Z

Matheus Nunes Reis¹, Jocinez Nogueira Lima², Patricia Cristina Cunha Nunes de Oliveira Fontoura³

¹ Centro Universitário de Brasília / matheusnreis95@gmail.com

² Centro Universitário de Brasília / jocinez.lima@ceub.edu.br

³ Centro Universitário de Brasília / patriciaacunha.arquitetura@gmail.com

Resumo

Devido ao desenvolvimento de novos materiais e processos construtivos, os modelos arquitetônicos e urbanos estão, ao longo do tempo, tornando-se maiores, mais esbeltos, econômicos, leves e, com isso, mais sensíveis a carregamentos horizontais, dentre os quais os ventos. *Designs* gradativamente mais arrojados também foram desenvolvidos no combate a essas ações. Além dos ventos, há também a ocorrência de imperfeições geométricas, como o desaprumo, as quais não são menos importantes na consideração do equilíbrio estrutural. Diante disso, tem-se a maior preocupação quanto aos efeitos de segunda ordem, principalmente em edificações mais altas. Este estudo tem como objetivo analisar os efeitos de segunda ordem em três edifícios de concreto armado e avaliar a importância destes estudos, considerando não linearidades física e geométrica, além de compreender a influência das rigidezes dos pilares, vigas e da presença e da não presença de vigas baldrame na estabilidade global. São desenvolvidos três modelos computacionais no *software Eberick V10*, o primeiro com 14 pavimentos, baseada em projeto real, e os demais com 8 e 20 pavimentos, com as mesmas propriedades físicas e geométricas iniciais que o primeiro. Em todos os modelos são consideradas a não linearidade física, segundo a NBR 6118/2014, e a não linearidade geométrica através do Método da Carga Lateral Fictícia. São variadas as rigidezes de pilares e vigas, e são retiradas as vigas baldrame para posterior comparação de resultados, com o intuito de estabelecer uma hierarquia das influências desses elementos em relação aos efeitos de segunda ordem. Estes efeitos são determinados através do processo P- Δ e Coeficiente γ_z .

Palavras-chave

Concreto armado; Edifício; Efeitos de segunda ordem; Processo P- Δ ; Coeficiente γ_z .

Introdução

Devido ao desenvolvimento de novos materiais e processos construtivos, os modelos arquitetônicos e urbanos estão, ao longo do tempo, tornando-se maiores, mais esbeltos, econômicos, leves e, portanto, mais sensíveis a carregamentos horizontais, dentre os quais os ventos. Com isso, torna-se importante estudar os efeitos de segunda ordem. LIMA (2001) cita que após a primeira deformada a relação entre os esforços e os deslocamentos é linear. Nas verificações de segunda ordem, a relação passa a ser não-

linear, na qual a estrutura é definida já na configuração deformada, gerando ,assim, esforços complementares.

Para que os efeitos de segunda ordem sejam considerados, dois conceitos devem ser incluídos: a não linearidade física e a geométrica. Na primeira, o material já não possui módulo de elasticidade constante, variando ao longo da aplicação da força, e, portanto, variando sua rigidez (EI). A NBR 6118/2014 permite simplificações ao recomendar os valores de 0,8EI para pilares e 0,4EI para vigas quando estas últimas possuem armaduras de tração diferentes das de compressão. A não linearidade geométrica é dizer sobre aquela causada pela alteração da geometria de uma edificação. Em outras palavras, seria um deslocamento dos elementos da estrutura como um todo, salvo o pavimento considerado fixo no qual se encontram as fundações. Essa nova configuração acarreta em alteração nos esforços internos, gerando, na maior parte dos casos, acréscimos destes (BUENO, 2014).

O processo P-Δ pelo Método da Carga Lateral Fictícia é uma forma refinada e iterativa de análise não linear geométrica, através do qual, quando também incluída a não linearidade física, podem ser determinados os efeitos globais de primeira e segunda ordem. LIMA (2001) explica que as cargas laterais fictícias (H_i) são estipuladas pela equação 1:

$$H_i = \frac{\sum V_i * d_i}{h_i} - \frac{\sum V_{(i+1)} * d_{(i+1)}}{h_{(i+1)}} \quad (1)$$

- V_i e $V_{(i+1)}$ = cargas verticais juntadas até os pavimentos i e i+1, respectivamente;

- h_i e $h_{(i+1)}$ = altura dos pavimentos i e i+1, na sequência;

- d e $d_{(i+1)}$ = deslocamentos horizontais relativos do pavimento i em relação ao pavimento i-1 e do pavimento i+1 em relação ao pavimento i, respectivamente;

Os resultados provindos deste método são dados em porcentagem, pois representam o acréscimo de deslocamento devido aos efeitos de segunda ordem.

A Norma Brasileira NBR 6118/2014 define que o fator γ_z indica a importância do efeito de segunda ordem global e que pode ser utilizado apenas em sistemas estruturais reticulados de no mínimo quatro pavimentos, podendo ser calculado conforme a equação 2:

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{tot,d}}{M1_{tot,d}}} \quad (2)$$

$\Delta M_{tot,d}$ = é a somatória dos produtos de todas as ações verticais presentes na estrutura, numa dada combinação, com seus valores de cálculo, pelos deslocamentos horizontais de seus pontos de atuação correspondentes, determinados na análise linear (primeira ordem);

$M1_{tot,d}$ = momento de tombamento, representado pelo somatório dos momentos de todas as forças horizontais atuantes, de uma dada combinação, com seus valores de cálculo, tomando como referência o suporte da estrutura;

A norma NBR 6118 preconiza que para uma estrutura ser considerada como de nós fixos e, conseqüentemente ser permitida a descon sideração de análise não linear mais rebuscada, isto é, de segunda ordem, a seguinte condição deve ser atendida: $\gamma_z \leq 1,1$. FRANCO & VASCONCELOS (1991) afirmam que o valor limite para o coeficiente γ_z seria de 1,2. Por se tratar de um coeficiente, os resultados são adimensionais.

Os cálculos de γ_z e P- Δ relacionam tanto a não linearidade física quanto a não linearidade geométrica.

Metodologia

São gerados três modelos de edifícios no *software Eberick V10* para realização do trabalho. O primeiro modelo, caracterizado como estudo de caso, usado como base para os demais, é uma estrutura real de 14 pavimentos, modelada a partir de dados retirados das plantas de forma. Nesta estrutura são consideradas cargas verticais permanentes e variáveis, forças horizontais de vento específicas da região do projeto em questão, além das não linearidades física e geométrica, necessárias para a determinação dos efeitos de segunda ordem.

Os efeitos de segunda ordem são calculados com a utilização do processo P- Δ (P-Delta), admitindo ação de vento, assim como desaprumos. São determinados, também, os valores do coeficiente γ_z , objetivando a verificação da eficiência estrutural, segundo o critério de $\gamma_z \leq 1,1$. Ainda no mesmo modelo, foram alteradas as rigidezes de pilares e vigas, variando 10% a mais e a menos os valores simplificados dos coeficientes da não linearidade física, baseadas na NBR 6118/2014, admitida em ambos os elementos. Ademais, a consideração da presença ou não das vigas baldrame foi aplicada no modelo, recalculando os valores de P- Δ e γ_z para o mesmo edifício com e sem vigas baldrame no pavimento térreo do projeto.

Importante citar que não são levadas diretamente em conta as rigidezes das lajes na determinação dos efeitos de segunda, pois o *software* utilizado não considera a rigidez destes elementos no pórtico espacial de cálculo, mas apenas as cargas verticais iniciais que transmitem para as vigas.

O segundo e terceiro modelos são genéricos, possuindo as mesmas características geométricas e físicas iniciais dos elementos da primeira modelagem, diferidos apenas no número de pavimentos. Foram adotadas diferenças de 6 pavimentos de um edifício para outro com o intuito de verificar as diferenças nos resultados referente à ação do vento e desaprumo.

Todos os procedimentos de alteração de rigidezes e considerações de vigas baldrame foram repetidas para os dois últimos modelos, determinado, assim, novos valores de P- Δ e γ_z . Por fim, são analisadas as influências das rigidezes dos elementos em questão, para cada modelagem, verificando as maiores diferenças encontradas após as alterações das rigidezes e retirada de baldrame.

Para a não linearidade física são consideradas as simplificações iniciais da NBR 6118/2014, a saber 0,8EI para pilares e 0,4EI para vigas. Essas aplicações podem ser adotadas porque os três modelos possuem mais de quatro pavimentos e o estudo restringe-se à análise global.

Na aplicação dos 10% a mais e a menos, mantém-se as vigas inalteradas com $0,4EI$, alternando os pilares em $0,7EI$, $0,8EI$ e $0,9EI$. Em seguida, é mantida a rigidez de $0,8EI$ para pilares, alternando as vigas em $0,3EI$, $0,4EI$ e $0,5EI$. A aplicação dessas alterações pode ser justificada pelo fato das simplificações de norma serem simplesmente médias aproximadas, onde o concreto não necessariamente atenderá aos valores $0,8EI$ e $0,4EI$ para pilares e vigas, respectivamente. Outro simples motivo seria a ocorrência de imperfeições construtivas. Sendo assim, para melhor verificação da influência das rigidezes de pilares e vigas nos efeitos de segunda ordem, são adotadas as alterações citadas.

A não linearidade geométrica é calculada pelo processo $P-\Delta$, através do Método da Carga Lateral Fictícia, levando em conta apenas os efeitos de segunda ordem globais. Para todos os cálculos é admitido número máximo de iterações igual à 20 e precisão mínima de 1%. Os valores encontrados no processo iterativo relacionam-se aos deslocamentos do topo da edificação, pois é nessa zona onde ocorrem os maiores deslocamentos.

Descrição da Edificação

A edificação é localizada em Brasília, na região administrativa de Samambaia, na quadra 301, conjunto 2, lotes de 1 a 4. Projetada para ser residencial, foi planejada com 14 pavimentos, constituindo pilotis, além de garagem térrea no terreno. No pavimento cobertura há piscina, a qual foi considerada como cheia d'água para realização dos cálculos neste estudo, reservatório superior e instalações de casa de máquinas, relacionadas à região do elevador.

A construção possui pilares de 20×100 cm e 30×100 cm, vigas e baldrames de 15×60 cm, lajes maciças com espessura de 12 cm e pé-direito no térreo de 2,78 m, sendo de 2,62 m para os demais pavimentos. O concreto utilizado é de classe de agressividade ambiental I, segundo a NBR 6118/2014, referente à baixa agressividade do ambiente em questão, f_{ck} de 30 Mpa para os elementos de vigas, lajes e baldrames, e 50 Mpa para pilares, além de armação com aço CA-50. A alvenaria é feita com tijolos furados e revestimentos são de argamassa padrão.

Modelos Computacionais

Três modelos numéricos foram gerados no *software Eberick V10*. O modelo 1, Figura 1, representa a edificação real descrita. O modelo 2, Figura 1, e modelo 3, Figura 2, são genéricos com as mesmas características físicas e geométricas do primeiro, diferenciados apenas pelo número de pavimentos, sendo o segundo com 8 pavimentos, e o terceiro com 20 pavimentos no total.

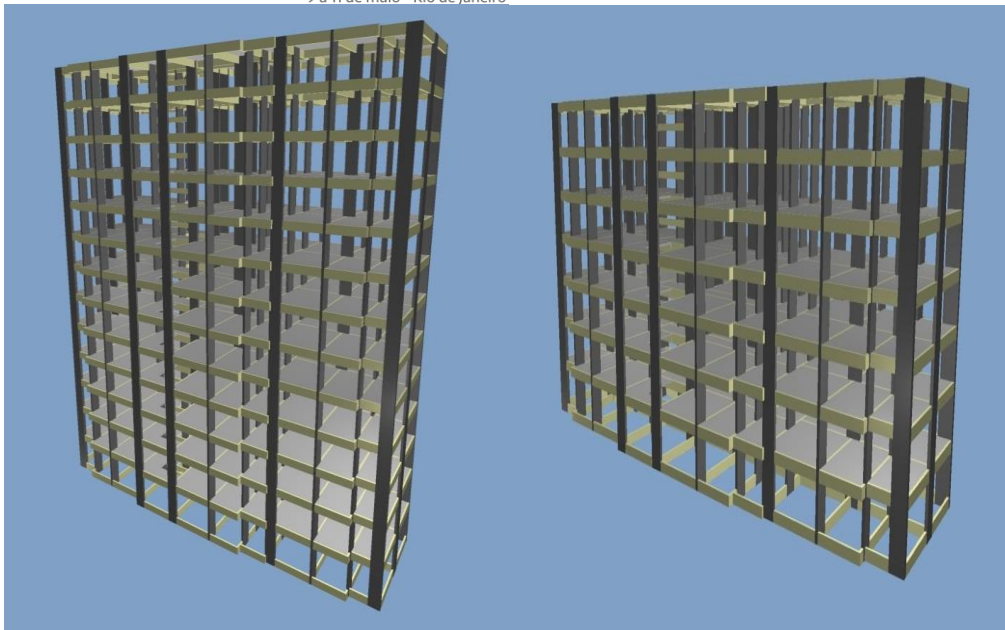


Figura 1 – Modelo 1 de 14 pavimentos (esquerda), e modelo 2 de 8 pavimentos (direita), gerados no Eberick. (Fonte: autor)

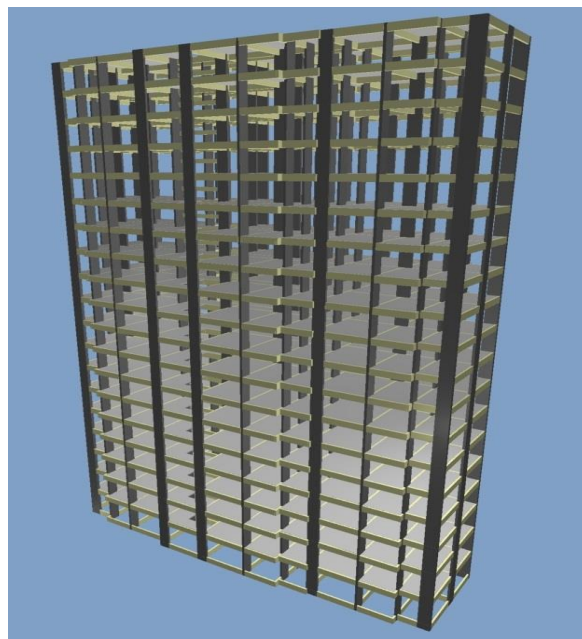


Figura 2 – Modelo 3 gerado no Eberick, 20 pavimentos. (Fonte: autor)

Cargas verticais permanentes e acidentais definidas conforme NBR 6120/1980: Pesos próprios dos todos os elementos calculados a partir das geometrias e pesos específicos dos materiais, lajes com 2 KN/m² para carga acidental em corredores, cobertura e demais ambientes, paredes com 2,32 m de altura e 15 cm de espessura, feitas de tijolos furados (13 KN/m³), escadas não modeladas na estrutura, porém com cargas equivalentes consideradas atuando diretamente nas vigas, admitindo carga

acidental de 3 KN/m², reservatório de 50000 L, cálculo de água considerando 10 KN/m³, não modelado, considerando cargas equivalentes aplicadas diretamente em pilares, revestimentos de 1 KN/m² e casa de máquinas de 7,5 KN/m².

Cargas horizontais definidas conforme NBR 6123/1988: Velocidade característica de 35 m/s, fator topográfico S1 igual à 1,0, fator de rugosidade S2 adotado na categoria II em todos os modelos, sendo classe B para o modelo 1, classe A para o modelo 2 e classe C para o modelo 3, fator estatístico S3 igual à 1,0. Desaprumo global aplicado conforme NBR 6118/2014.

Análise e Resultados

Os valores encontrados no processo P-Δ relacionam-se aos deslocamentos do topo da edificação, pois é nessa zona onde ocorrem os maiores deslocamentos. As diferenças mostradas nas Figuras são mostradas em módulo de forma a facilitar a compreensão nas comparações.

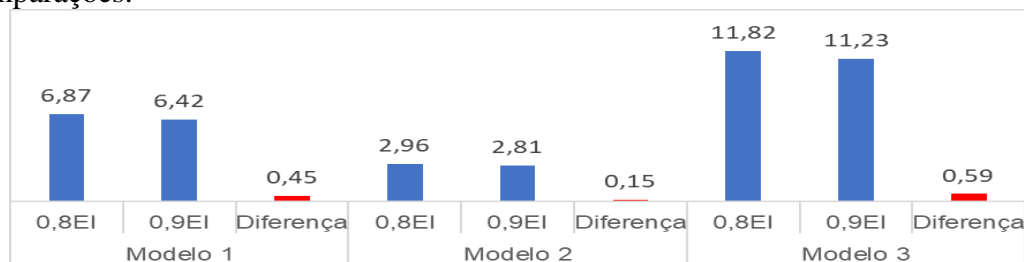


Figura 3 – Valores de P-Δ (%) após aumento das rigidezes dos pilares. (Fonte: autor)

A Figura 3 mostra as diferenças determinadas nos valores de P-Δ de 0,45%, 0,15% e 0,59% para os modelos 1, 2 e 3 respectivamente, após aumento de rigidez dos pilares.

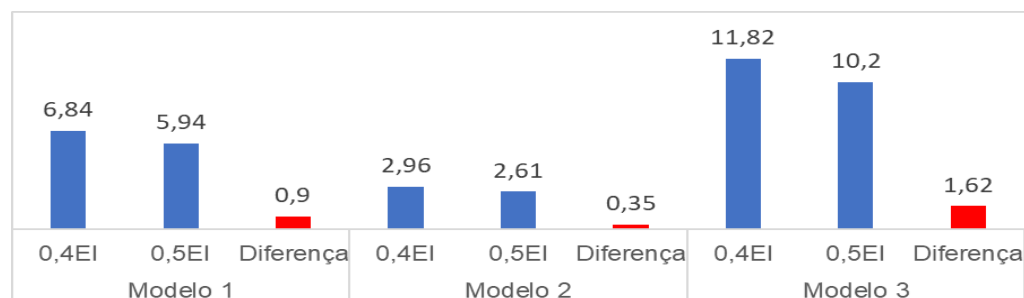


Figura 4 – Valores de P-Δ (%) após aumento das rigidezes das vigas. (Fonte: autor)

A Figura 4 mostra as diferenças determinadas nos valores de P-Δ de 0,9%, 0,35% e 1,62% para os modelos 1, 2 e 3 respectivamente, após aumento de rigidez das vigas.

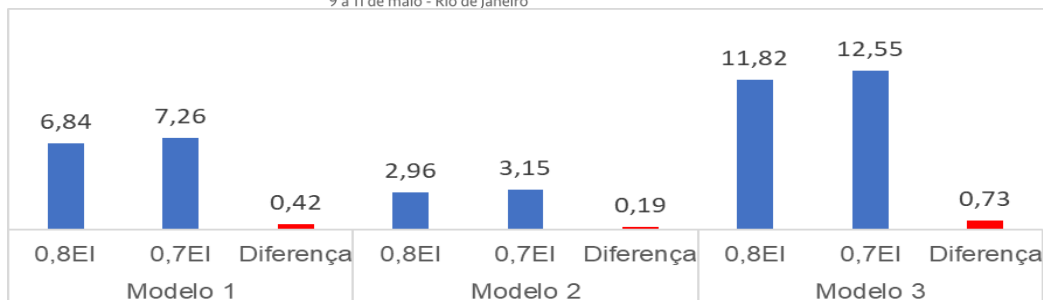


Figura 5 – Valores de P- Δ (%) após redução das rigidezes dos pilares. (Fonte: autor)

A Figura 5 mostra as diferenças determinadas nos valores de P- Δ de 0,42%, 0,19% e 0,73% para os modelos 1, 2 e 3 respectivamente, após redução da rigidez dos pilares.

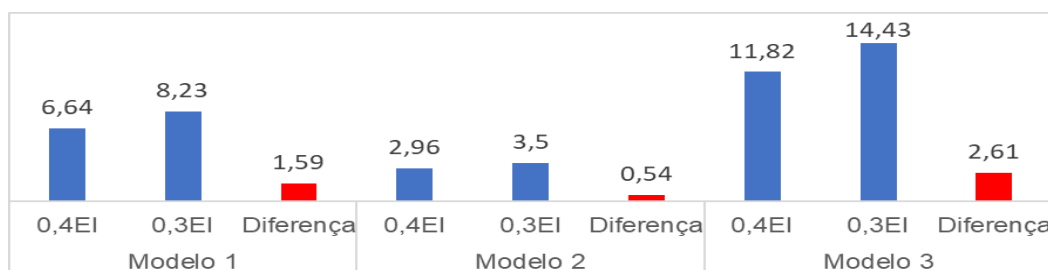


Figura 6 – Valores de P- Δ (%) após redução das rigidezes das vigas. (Fonte: autor)

A Figura 6 mostra as diferenças determinadas nos valores de P- Δ de 1,59%, 0,54% e 2,61% para os modelos 1, 2 e 3 respectivamente, após redução da rigidez das vigas.

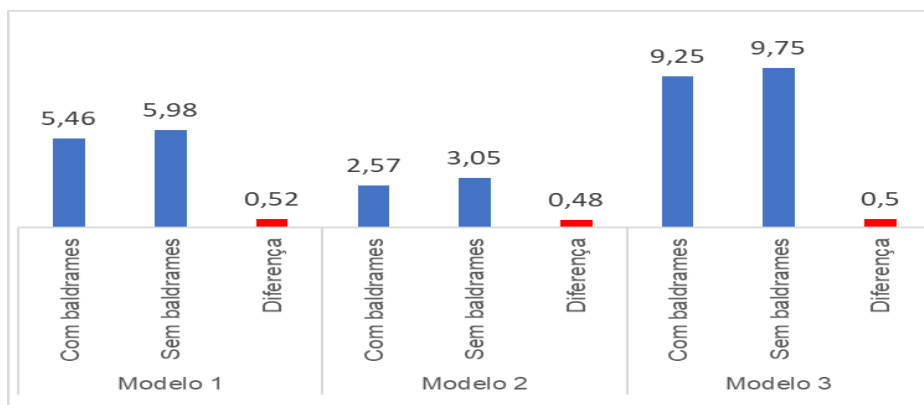


Figura 7 – Valores de P- Δ (%) após retirada das vigas baldrame. (Fonte: autor)

A Figura 7 mostra as diferenças determinadas nos valores de P- Δ de 0,52%, 0,48% e 0,5% para os modelos 1, 2 e 3 respectivamente, após retirada das vigas baldrame.

As alterações nas rigidezes das vigas causaram diferenças mais significativas de 1,59%, 0,54% e 2,61%, Figura 6, para todos os modelos. Para os modelos 1 e 2, as segundas diferenças mais consideráveis foram após alterações nas rigidezes das baldramas, com diferenças de 0,52% e 0,48% respectivamente, Figura 7. No modelo 3, a segunda maior diferença foi após alteração na rigidez dos pilares, com 0,73%, Figura 5.

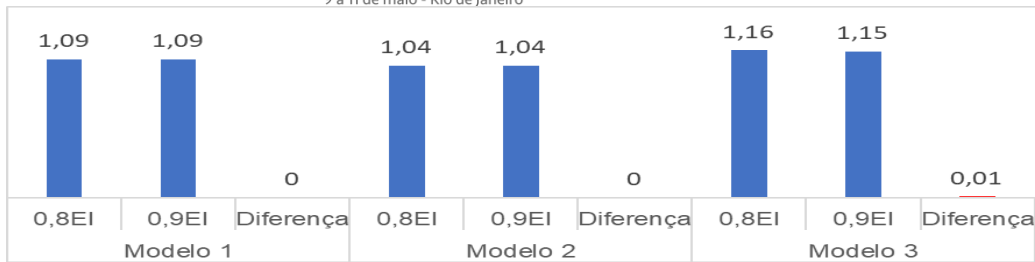


Figura 8 – Valores de γ_z após aumento das rigidezes dos pilares. (Fonte: autor)

A Figura 8 mostra a única diferença determinada nos valores γ_z de 0,01 para o modelo 3, após aumento da rigidez dos pilares.

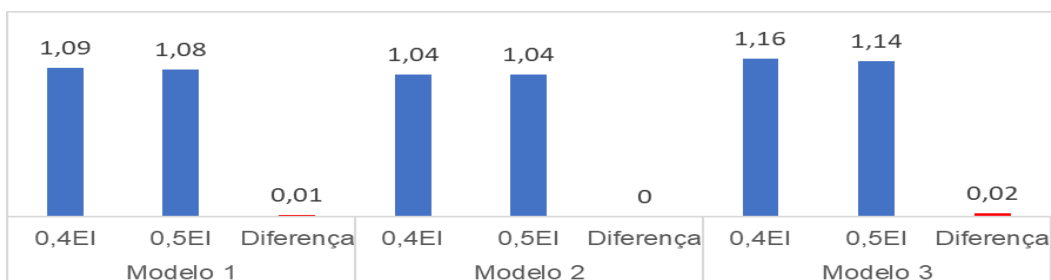


Figura 9 – Valores de γ_z após aumento das rigidezes das vigas. (Fonte: autor)

A Figura 9 mostra as diferenças determinadas nos valores de γ_z de 0,01 e 0,02 para os modelos 1 e 3 respectivamente, após aumento da rigidez das vigas.

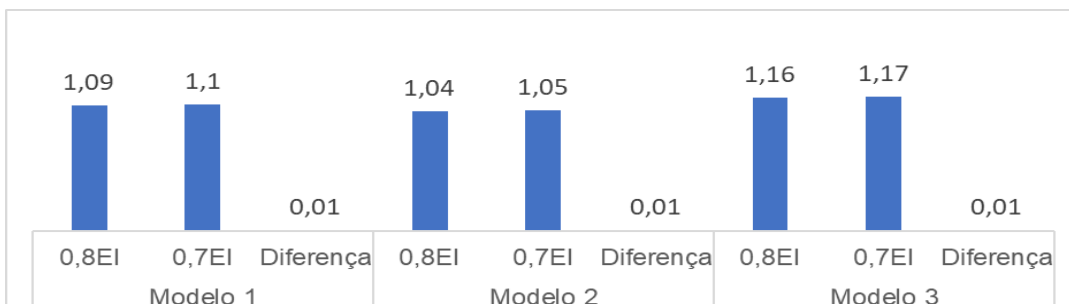


Figura 10 – Valores de γ_z após redução das rigidezes dos pilares. (Fonte: autor)

A Figura 10 mostra as diferenças determinadas nos valores de γ_z de 0,01 para todos os modelos, após redução da rigidez dos pilares.

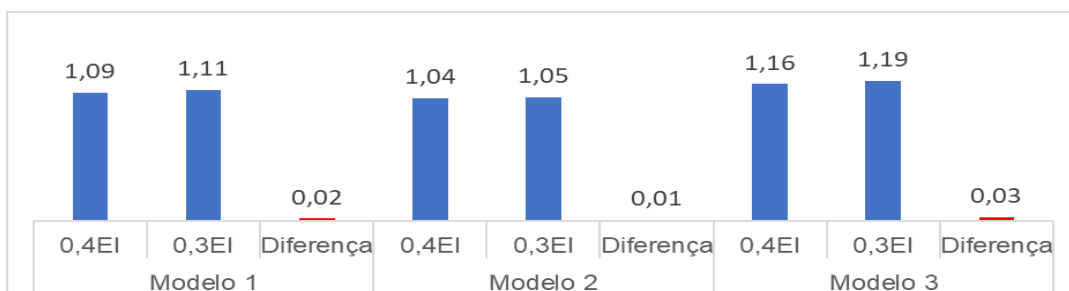


Figura 11 – Valores de γ_z após redução das rigidezes das vigas. (Fonte: autor)

A Figura 11 mostra as diferenças determinadas nos valores de γ_z de 0,02, 0,01 e 0,03 para os modelos 1, 2 e 3 respectivamente, após redução da rigidez das vigas.

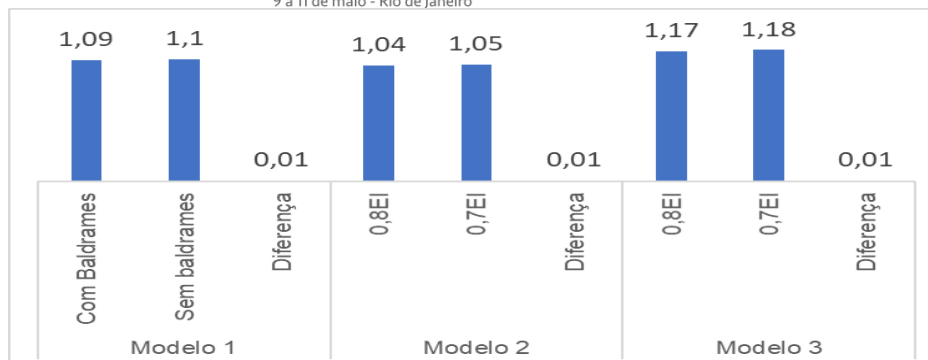


Figura 12 – Valores de γ_z após retirada das vigas baldrames. (Fonte: autor)

A Figura 12 mostra as diferenças determinadas nos valores de γ_z de 0,01 para todos os modelos, após retirada das vigas baldrame.

As alterações nas rigidezes das vigas causaram diferenças mais significativas de 0,02, 0,01 e 0,03, Figura 11, para todos os modelos. Para os três modelos, as segundas diferenças mais consideráveis foram tanto após alterações nas rigidezes das baldrames quanto dos pilares, com a mesma diferença de 0,01, pelas Figuras 10 e 12.

Conclusões

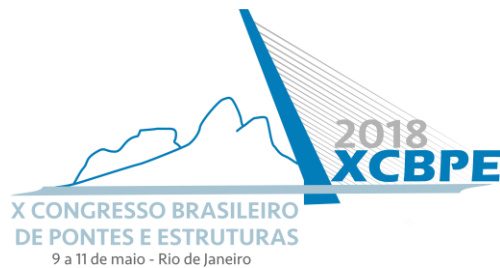
Percebe-se, pelos resultados do P- Δ , que as rigidezes das vigas têm maior representatividade nos modelos estruturais. Para os modelos 1 e 2, com 14 e 8 pavimentos respectivamente, as vigas baldrame possuem representatividade maior na estrutura que os pilares. Porém, quando a estrutura possui 20 pavimentos, modelo 3, os pilares passam a ser mais significativos que as baldrames.

É possível identificar, pelos resultados do γ_z , que as rigidezes das vigas possuem maior representatividade nos modelos estruturais, de maneira geral. Os pilares e vigas baldrames demonstraram mesmo grau de relevância nos três modelos. Isso ocorre provavelmente pelo fato do coeficiente γ_z ser uma forma aproximada de estimar os efeitos, diferentemente do processo P- Δ , que traz resultados mais refinados.

Para o modelo 1, os valores encontrados do coeficiente γ_z encontram-se de acordo com o limite de 1,1 estabelecido na NBR 6118/2014, exceto na condição das vigas com rigidez reduzida para 0,3EI. No modelo 2, para todas as condições, os coeficientes encontram-se conforme o limite da NBR 6118, o que era de esperar, por ser o edifício com menor número de pavimentos. No modelo 3, para praticamente todas as considerações, os valores de γ_z encontram-se em desacordo com o limite da norma, como esperado, por conter maior quantidade de pavimentos. Apesar das discordâncias com o padrão de norma, todos os valores de γ_z de todos os modelos encontram-se dentro dos limites estabelecidos por FRANCO & VASCONCELOS (1991).

É comum de se pensar que vigas baldrame não tenham tanta influência nas deformações da edificação como um todo, principalmente no topo, pelo fato destas serem aplicadas no nível do solo. Entretanto, este trabalho demonstra que sua existência não deve ser ignorada em projeto.

Importante destacar que o estudo demonstra, para a edificação do projeto especificado, a relevância dos elementos levando em consideração a comparação de



resultados quanto à variação das rigidezes destes e da presença das vigas baldrame. Estruturas com diferentes concepções, seja por diferente posicionamento e direção de pilares, por exemplo, podem trazer conclusões distintas.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6118 - Projeto de Estruturas de Concreto Armado: Procedimento. 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6120 - Cargas para o Cálculo de Estruturas de Edificações. 1980. (versão corrigida: 2000)
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6123 - Forças Devidas ao Vento em Edificações. 1988. (versão corrigida 2 de 2013)
- BUENO, M. E. M. Estudo de Valores de Rigidez Equivalente para Vigas e Pilares para Análise Não Lineares em Estruturas de Concreto Armado de Pequeno Porte. 238 f. Tese - Universidade de Brasília. Brasília. 2014.
- FRANCO, M.; VASCONCELOS, A.C. Practical assessment of second order effects in tall buildings. In: COLOQUIUM ON THE CEB-FIP MC90 - Proceedings, p.307-324, 1991.
- LIMA, J.S. Verificação da Punção e da Estabilidade Global em Edifícios de Concreto: Desenvolvimento e Aplicação de Recomendações Normativas. 225 f. Dissertação - Universidade de São Paulo. São Carlos. 2001.