

Análise da Influência da Rigidez das Ligações Viga-Pilar em um Edifício de Concreto Armado

Filipe Marinho Nascimento¹, José de Moura Rêgo Neto²

¹Universidade Federal do Piauí / Departamento de Recursos Hídricos e Geotecnia e Saneamento Ambiental / filipemarinhon@gmail.com

²Universidade Federal do Piauí / Departamento de Estruturas / jmoourarn@gmail.com

Resumo

A análise estrutural é uma das etapas mais importantes no dimensionamento estrutural. Tal etapa consiste em obter modelos simplificados, mas que se assemelhem com o comportamento real da estrutura. Convencionalmente, se considera as ligações viga-pilar como perfeitamente rígidas, porém estudos experimentais obtiveram como resultado rotações relativas entre vigas e pilares, o que as caracteriza como ligações semirrígidas. Nesse contexto, a consideração da rigidez nas ligações viga-pilar de uma edificação é um fator ainda pouco explorado e muito importante para uma análise mais precisa. O presente trabalho é voltado para acadêmicos e profissionais da área, objetivando além de analisar a influência da rigidez das ligações viga-pilar em um edifício de concreto armado, discutir a importância da mesma para uma adequada análise estrutural. O desenvolvimento do trabalho é realizado a partir da elucidação dos conceitos básicos acerca do tema, da análise de quatro modelos de edificação, cada um com um diferente fator de restrição de rotação para as ligações viga-pilar e da comparação e discussão dos resultados obtidos. Nesse cenário, comprova-se a importância de uma análise mais minuciosa relativa às rigidezes das ligações entre vigas e pilares, visto que a sua consideração para o edifício proposto neste trabalho proporcionou mudanças principalmente nos valores dos parâmetros de estabilidade global da estrutura.

Palavras-chave

Análise Estrutural; Ligações Semirrígidas; Estabilidade Global.

Introdução

Nas últimas décadas, o desenvolvimento de técnicas computacionais com foco na análise estrutural tornou tal processo mais ágil e confiável. Entretanto, para que a análise seja bem realizada, é papel do projetista idealizar o comportamento estrutural da edificação.

Nesse contexto, um dos fatores importantes é a rigidez das ligações viga-pilar. As normas técnicas brasileiras, de maneira geral, reconhecem que tal rigidez tem influência na análise estrutural, mas não preconizam instruções específicas de como essa influência deve ser considerada no projeto estrutural (SANTOS, 2016).

A modificação das rigidezes dos nós de uma edificação altera o comportamento da estrutural tanto local quanto globalmente, visto que tais rigidezes impactam nos valores dos deslocamentos horizontais e por consequência nos efeitos de segunda ordem na estrutura. Todavia, o estudo dessa rigidez nem sempre é realizada na análise estrutural, negligenciando, assim, impactos no comportamento estrutural (SANTOS, 2016).

O trabalho insere-se nesse cenário, com a proposição de analisar a influência dessa rigidez em um edifício de concreto armado de seis pavimentos, principalmente no que diz respeito à estabilidade global da edificação, e comparar os resultados obtidos com outros estudos relacionados, como o de SANTOS (2016).

Utilizando conceitos elucidados por autores como FERREIRA (1999), ALVA (2004) e SANTOS (2016), além das prescrições normativas nacionais, pode-se elaborar modelos estruturais, diferenciando-os a partir de fatores de restrição à rotação nas ligações viga-pilar, e, de posse dos resultados da análise estrutural, realizada com o auxílio do “software” CAD TQS v20, determinar a influência da rigidez das ligações viga-pilar na edificação proposta.

Ligações viga-pilar

As ligações viga-pilar, também ditas nós de pórtico, são regiões de concentração de tensões normais e tangenciais. O estudo do comportamento de tais ligações é indispensável para a adequada análise estrutural e conseqüentemente, detalhamento das peças (SANTOS, 2016).

De maneira geral, tais ligações podem ser classificadas de acordo com a rigidez à flexão das mesmas:

- Rígidas: ligações que transmitem integralmente momentos fletores;
- Semirrígidas: ligações que transmitem parcialmente momentos fletores;
- Articuladas: ligações que não transmitem momentos fletores.

FERREIRA (1999) e ALVA (2004) observaram, através de experimentos, que em ligações viga-pilar de concreto armado ocorrem rotações relativas devido a fissuração do concreto e deslizamento das armações longitudinais das vigas na ligação, como é ilustrado na Figura 1.

Então, pode-se concluir que as ligações viga-pilar podem ser classificadas como semirrígidas. Na análise estrutural de edifícios de concreto armado é usual a consideração de nós de pórtico com ligações rígidas. Tal consideração pode levar a deslocamentos menores do que ocorridos na prática (SANTOS, 2016).

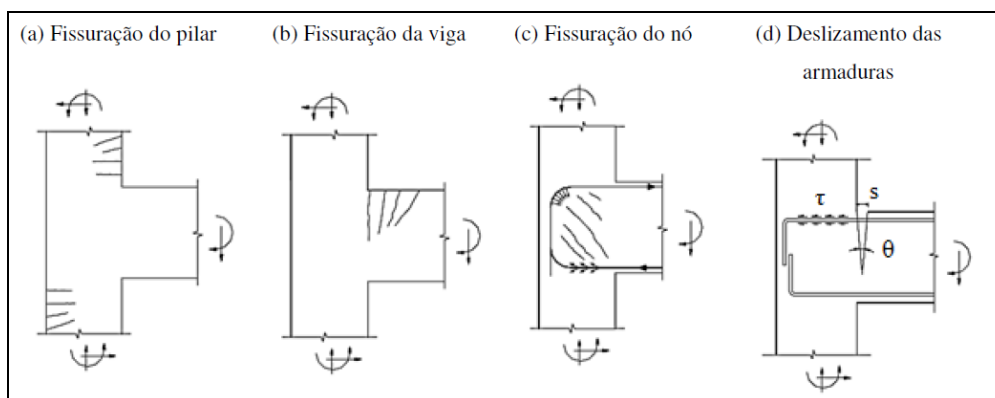


Figura 1 - Fissuração e deslizamento das armaduras nos nós de pórtico

Um parâmetro importante que se pode aferir da curva momento-rotação é o fator de restrição à rotação, que indica o “grau de rigidez” da ligação. O fator $\alpha_R = 1,0$ indica

uma ligação perfeitamente rígida, enquanto $\alpha_R = 0$ indica uma ligação perfeitamente articulada. Segundo SANTOS (2016), o fator de restrição à rotação pode ser entendido como a relação entre a rotação do elemento (θ_1) e a rotação do elemento somada à da ligação (θ_2), como pode ser observado na Figura 2.

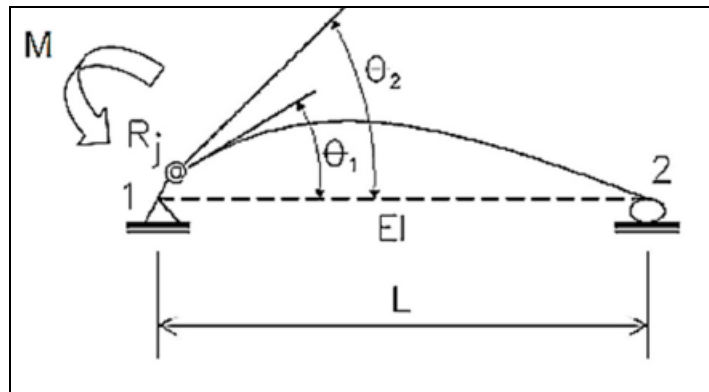


Figura 2 - Fator de restrição à rotação

A ABNT NBR 9062:2017 (Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado) adota a análise da rigidez das ligações por meio do parâmetro α_R , que leva em consideração a rigidez secante à flexão negativa da ligação (R_{sec}), através da equação (1).

$$\alpha_R = \frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{\frac{M \cdot L}{3 \cdot E \cdot I}}{\frac{M \cdot L}{3 \cdot E \cdot I} + \frac{M}{R}} = \frac{1}{1 + \frac{3 \cdot E \cdot I}{R \cdot L}} \quad (1)$$

Onde:

- R : rigidez da ligação;

A norma preconiza que deve ser utilizada a rigidez secante da ligação viga-pilar (R_{sec}) para o correto cálculo de α_R . Tem-se então:

$$R_{sec} = k \cdot \frac{A_s \cdot E_s \cdot d^2}{L_{ed}} \quad (2)$$

Onde:

- k : coeficiente de ajustamento da rigidez secante, que varia de acordo com o tipo de ligação viga-pilar;
- L_{ed} : comprimento efetivo de deformação por alongamento da armadura de continuidade;
- d : altura útil da seção resistente na ligação negativa;
- E_s : módulo de elasticidade do aço;
- A_s : armadura de continuidade negativa;

Então, pode-se chegar à Equação (3):

$$\alpha_R = \frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{1}{1 + \frac{3 \cdot (E \cdot I)_{\text{sec}}}{R_{\text{sec}} \cdot L_{\text{ef}}}} \quad (3)$$

A ABNT NBR 6118:2014 preconiza que pode ser efetuada uma redução na transmissão de momentos fletores de vigas para pilares através de um coeficiente de redistribuição δ , contanto que sejam respeitadas as condições expostas nas Equações (4) e (5).

$$\frac{x}{d} \leq \frac{\delta - 0,44}{1,25} \quad \text{para } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (4)$$

$$\frac{x}{d} \leq \frac{\delta - 0,56}{1,25} \quad \text{para } 50 \text{ MPa} \leq f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \quad (5)$$

Onde:

x : profundidade da linha neutra;

Outro limite imposto pela ABNT NBR 6118:2014 é que $\delta \geq 0,9$ para estruturas de nós móveis. Para qualquer outra situação, $\delta \geq 0,75$.

Apresentação do edifício analisado

Para o adequado prosseguimento desse trabalho, foram desenvolvidas formas estruturais padrão, que serão as mesmas utilizadas para todos os modelos estruturais, que serão citados posteriormente.

O edifício proposto é composto pelos seguintes pavimentos:

- Fundação: pavimento onde nascem os pilares;
- Térreo: pavimento onde começam a atuar as ações do vento;
- Tipo: cinco repetições do pavimento tipo;
- Cobertura: com mesma forma do tipo, porém com cargas solicitantes diferentes;

A distância entre o pavimento Fundação e o pavimento Térreo é de 2,0 metros. A distância entre todos os demais pavimentos do edifício proposto é de 3,15 metros. O corte esquemático da estrutura pode ser visualizado na Figura 3.

Como características do edifício, foi adotada a resistência característica de compressão do concreto $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$ para todos os elementos estruturais. Também foi adotada a Classe de Agressividade Ambiental II, ou seja, foi considerado um ambiente urbano com baixo risco de deterioração.

Todos os cobrimentos adotados seguiram as prescrições da ABNT NBR 6118:2014 e são descritos abaixo:

- Lajes: 2,5 cm;
- Vigas e pilares: 3,0 cm.

Para as cargas de vento, também foram seguidas as prescrições normativas da ABNT NBR 6123:1988. Foram escolhidas características locais da cidade de Teresina, Piauí.

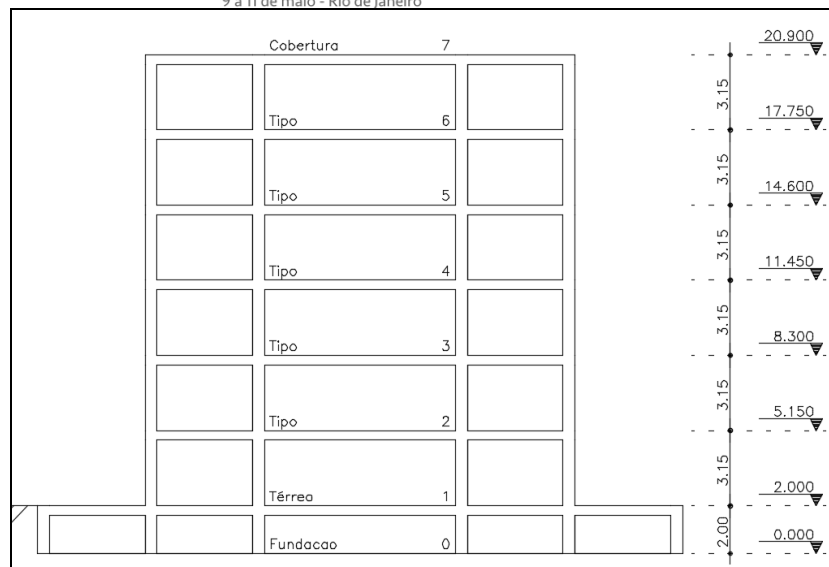


Figura 3 - Corte esquemático do edifício proposto

O cálculo do coeficiente de arrasto também foi feito com o auxílio do “software” CAD TQS v20. A partir da inserção das dimensões do edifício, o “software” interpola os valores no ábaco presente na norma e retorna os valores do coeficiente de arrasto que serão utilizados no cálculo de ações do vento na edificação. Foi escolhida a região da edificação como de baixa turbulência.

A forma estrutural elaborada para o edifício proposto é exposta na Figura 4. Como pode-se perceber, as dimensões de todos os pilares da edificação são 35x35 cm e todas as vigas tem dimensão de 20x35 cm. Para o pavimento Térreo, não foi considerada nenhuma laje. Foi adotada uma carga de 3,15 m de alvenaria equivalente a um carregamento distribuído de 0,85 tf/m em todas as vigas do pavimento.

Para o pavimento tipo, as vigas foram submetidas aos mesmos carregamentos do pavimento térreo. Nesse pavimento, foram adotadas lajes maciças, com 15 cm de espessura e sobre elas, a atuação de cargas permanentes de 100 kgf/m² e cargas acidentais de 200 kgf/m².

No pavimento cobertura, foram adotadas lajes com menor espessura, 10 cm, e submetidas a carregamentos inferiores aos carregamentos do pavimento tipo. Na cobertura, foi considerado 100 kgf/m² de carga permanente e 50 kgf/m² de cargas acidentais. Além disso, nas vigas, foi adotado como carregamento referente a uma parede de 1,0 metro de altura, em contraponto com os 3,15 metros dos demais pavimentos.

Vale ressaltar que os balanços inseridos na estrutura nos pavimentos tipo e cobertura tem o intuito de diferenciar os valores obtidos pelos parâmetros de estabilidade global γ_z e F_{avt} .

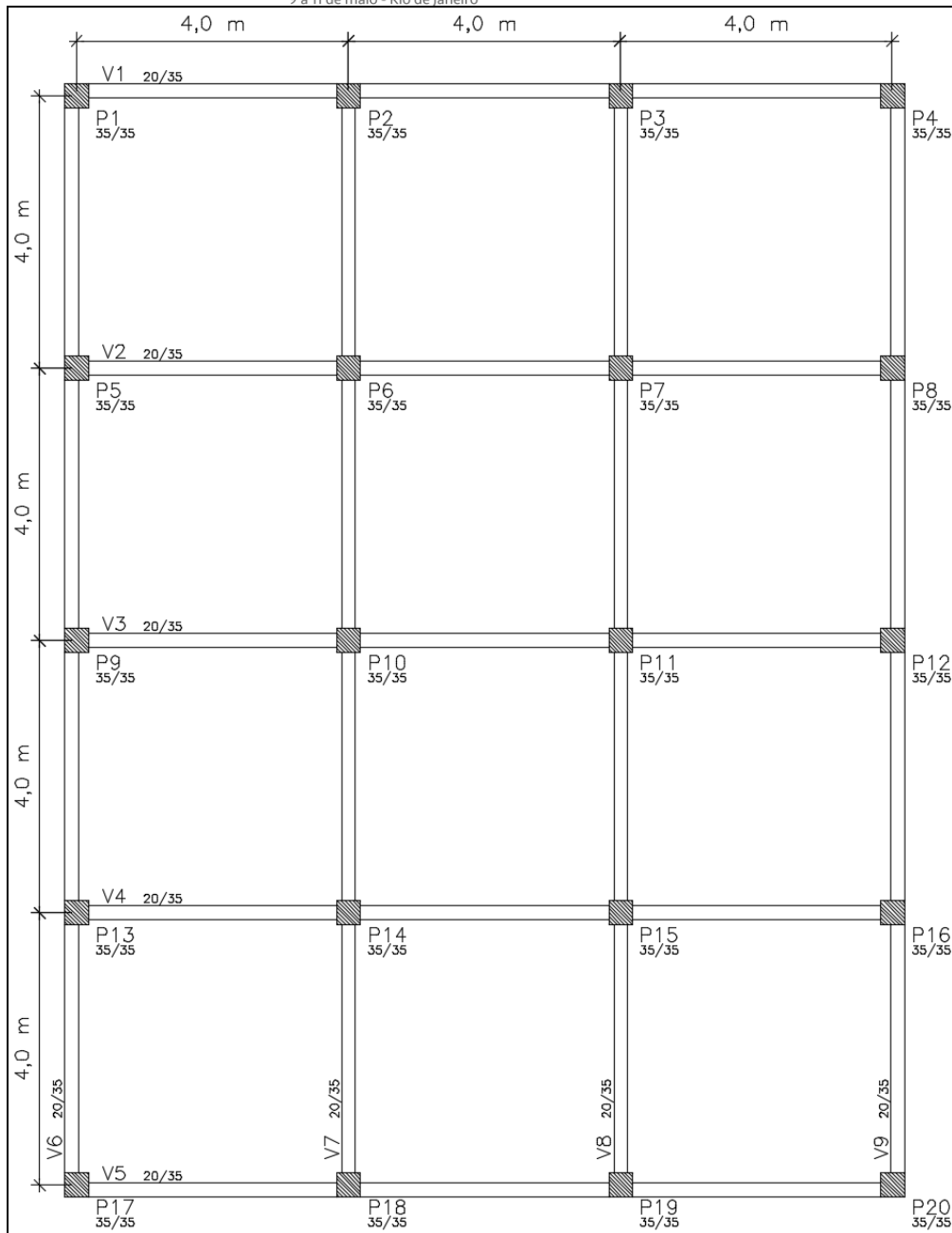


Figura 4 - Forma padrão do edifício proposto

Todas as características citadas acima são comuns a todos os quatro modelos estruturais criados neste trabalho. Os modelos se diferenciam apenas no fator de restrição à rotação α_r , nas ligações viga-pilar, seguindo o seguinte esquema:

- Modelo 1: $\alpha_r = 1,0$;
- Modelo 2: $\alpha_r = 0,85$;
- Modelo 3: $\alpha_r = 0,8$;
- Modelo 4: $\alpha_r = 0,75$.

Por padrão do “software” CAD TQS v20, todas as ligações viga-pilar são consideradas perfeitamente rígidas, ou seja, possuem $\alpha_r = 1,0$, porém o “software” oferece a liberdade de modificar esse fator, como pode ser visto na Figura 5 e Figura 6.

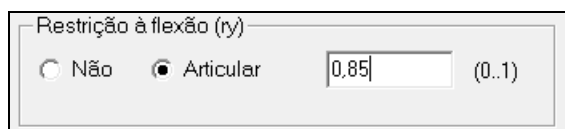


Figura 5 - Dado de entrada de fator de restrição à rotação

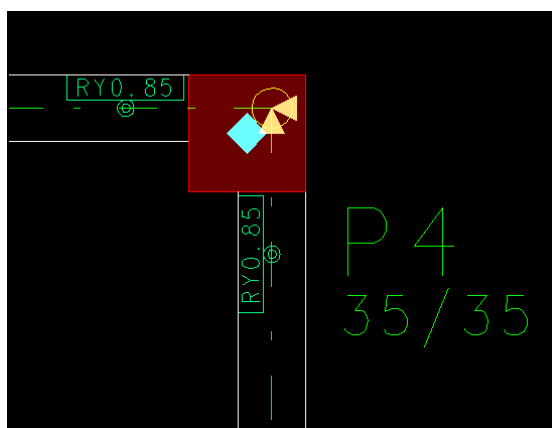


Figura 6 - Inserção do fator de restrição no modelador estrutural

Todos os quatro modelos foram devidamente processados pelo “software” e foi retornado ao usuário o detalhamento de todas as peças e resumos estruturais, com os quais se pôde fazer uma análise comparativa entre os modelos para determinação da influência da rigidez das ligações viga-pilar no edifício proposto.

Análise dos resultados

De posse dos dados de saída do “software” CAD TQS v20, foi possível realizar uma comparação entre os quatro modelos propostos, com diferentes fatores de restrição à rotação. A seguir serão expostos gráficos comparativos para diversos parâmetros, como armações de vigas e pilares, parâmetros de estabilidade global e deslocamentos na estrutura.

Inicialmente, comparando-se as armações totais utilizadas nos pilares de cada modelo, como é possível visualizar na Figura 7, percebe-se que não ocorreu para o edifício em estudo grande variação de armadura ao se modificar o α_r . A diferença absoluta em armação do Modelo 1 para os demais modelos foi de apenas 0,01 ton. Provavelmente, o pré-dimensionamento dos pilares não foi preciso e muitos dos pilares apresentaram armação mínima, o que ocasionou essa diferença desprezável.

Analisando as armações das vigas, percebe-se que houve um decréscimo de armação com a diminuição de α_r , como pode ser visto na Figura 8. Tal resultado vai de oposição ao esperado inicialmente, visto que outras pesquisas, como a de SANTOS (2016) apontam um aumento de armação quando aumentado o fator de restrição à rotação. Acredita-se, então, que para o edifício proposto neste trabalho, que para o

Modelo 1, em que as ligações são perfeitamente rígidas, os momentos fletores negativos nos apoios estavam elevados e os momentos positivos possuíam baixos valores, o que levava a armação mínima. Ao se liberar um pouco de rotação nos apoios, o momento negativo diminuiu, porém o positivo não aumentou o suficiente para que superasse o valor correspondente ao momento de armadura mínima, por isso, para o edifício proposto ocorreu apenas uma diminuição nas armações das vigas.

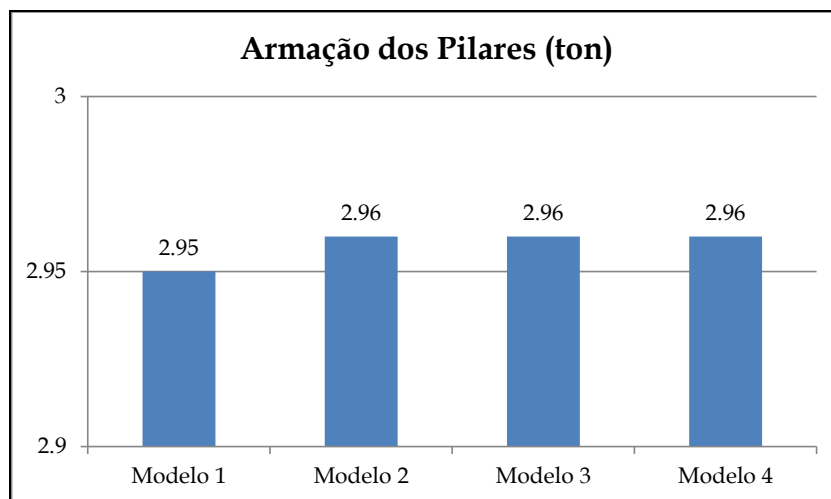


Figura 7 - Armação dos pilares

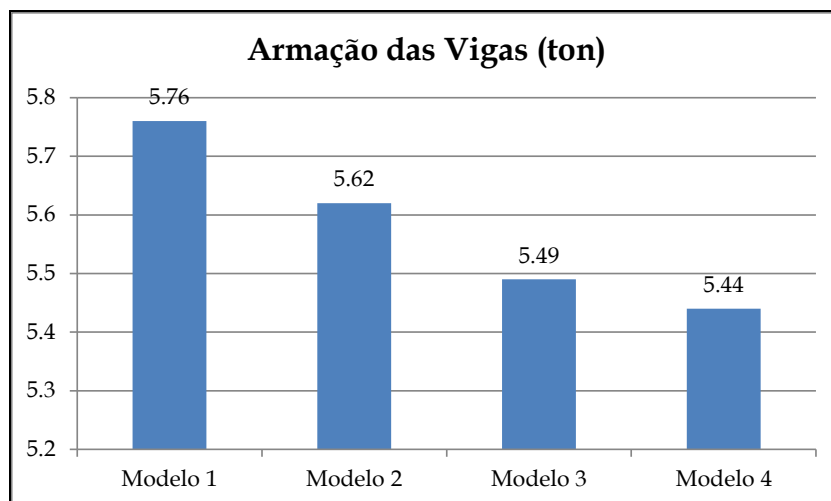


Figura 8 - Armação das vigas

Em relação aos parâmetros de estabilidade global, todos apresentaram um acréscimo quando aumentado α_r , como era esperado. Tal acréscimo pode ser visualizado nas Figura 9, Figura 10 e Figura 11. Vale ressaltar a diferença de valores entre os valores γ_z e F_{avt} devido à presença do balanço nas formas do tipo e da cobertura. É importante salientar também que o aumento nos parâmetros não foi tão elevado principalmente por se tratar de uma edificação pequena. É esperado que para edificações de maior porte, a influência de α_r na estabilidade global do edifício seja ainda maior.

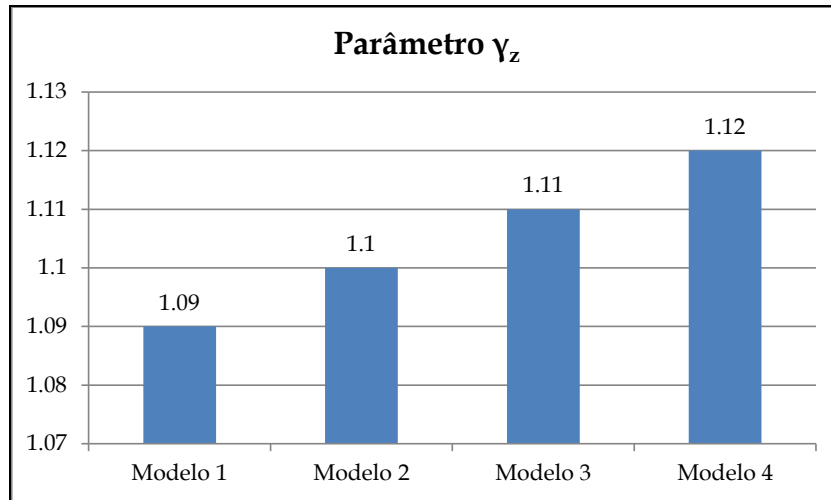


Figura 9 – Parâmetro γ_z

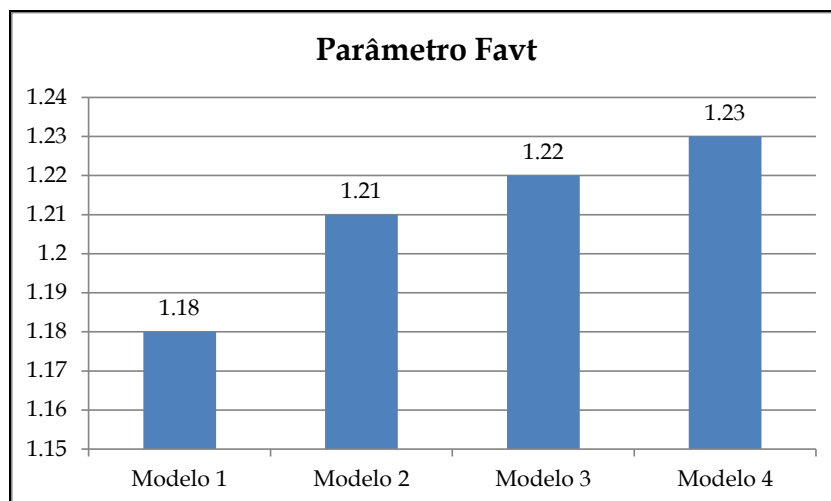


Figura 10 - Parâmetro F_{avt}

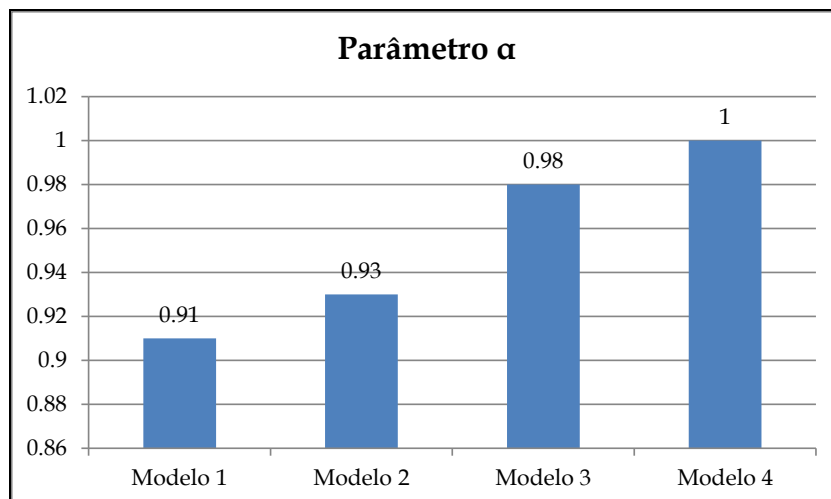


Figura 11 – Parâmetro α

Conclusões

A partir do trabalho realizado, é possível perceber com mais clareza alguns princípios básicos e muito importantes para uma adequada análise estrutural. Após a análise dos dados obtidos a partir do “*software*” CAD TQS v20, apurou-se que a rigidez das ligações viga-pilar em um edifício de concreto armado apresenta influência nas armações das peças e principalmente na estabilidade global do edifício.

Os resultados apontam, para o edifício proposto neste trabalho, uma economia de aço em vigas, cerca de 300 kg, e um acréscimo em pilares, 10 kg, quando considerado o valor máximo normativo para o fator de restrição à rotação nas ligações viga-pilar.

Além disso, foi exposto que todos os parâmetros de estabilidade global analisados (parâmetro γ_z , F_{avt} e parâmetro α) apreciaram um acréscimo quando aumentado o α_r . Para o parâmetro γ_z pode-se perceber que a classificação da estrutura foi modificada de nós fixos, no Modelo 1, para nós móveis nos demais modelos, em que foram considerados fatores de restrição à rotação nas ligações.

Segundo a ABNT NBR 6118:2014, a análise estrutural de qualquer edificação deve ser feita a partir de um modelo adequado para tal análise, ou seja, um modelo que consiga representar de maneira próxima da real, as condições do edifício. Nesse contexto, mostra-se de extrema importância a consideração da rigidez nas ligações viga-pilar, visto que de fato na prática tais ligações não são perfeitamente rígidas e que desprezar esse efeito pode levar a análises errôneas, principalmente em relação à estabilidade global do edifício.

Ressalta-se, por fim, que é esperado que quanto maior for a altura do edifício analisado, maior será a influência da consideração da rigidez das ligações viga-pilar na análise de estabilidade global da estrutura.

Referências

- ALVA, G.M.S. Estudo teórico-experimental do comportamento de nós de pórtico de concreto armado submetidos a ações cíclicas. 2004. 218p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9062: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- FERREIRA, M.A. Deformabilidade de ligações viga-pilar de concreto pré-moldado. 1999. 231p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.
- SANTOS, Júlia Borges dos. Análise da influência da rigidez das ligações viga-pilar no comportamento estrutural de edifícios de múltiplos pavimentos em concreto armado. 2016. 164p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.
- TQS INFORMÁTICA. CAD/TQS® - Manual III: Análise estrutural v.3. São Paulo: TQS Informática, 2017.