

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO NÚCLEO RÍGIDO E DAS LIGAÇÕES SEMIRRÍGIDAS NO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE EDIFÍCIOS COM ESTRUTURAS PRÉ-MOLDADAS DE CONCRETO

Roger Otávio Pires Montes¹
Marcelo Antonio Moreira de Sousa²
Maycon dos Reis Rosário³

RESUMO

Esse artigo tem a finalidade de analisar a influência do núcleo rígido e das ligações semirrígidas na estabilidade global de estruturas pré-moldadas. Para este estudo adotou-se uma estrutura com e sem núcleo rígido, onde foi variado o valor do fator de restrição à rotação α_R das ligações viga-pilar e, também, o número de pavimentos do edifício. Assim, foi possível identificar a influência desses artificios na estabilidade global da estrutura através da análise dos valores de γ_Z , deslocamento horizontal, momento fletor na base do pilar e momentos fletores positivos e negativos na viga. Foi possível perceber que quanto maior a altura do edifício, maior será o fator de restrição α_R das ligações viga-pilar necessário para garantir a estabilidade da estrutura. No entanto, a adição do núcleo rígido permitiu uma diminuição do fator de restrição α_R necessário para garantir a estabilidade da estrutura.

Palavras-chave: Estrutura pré-moldada, estabilidade global, ligação semirrígida, núcleo rígido.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF RIGID CORE AND SEMI-RIGID CONNECTIONS ON THE STRUCTURAL BEHAVIOR OF BUILDINGS WITH PRECAST CONCRETE STRUCTURES

ABSTRACT

This study intends to analyze the influence of rigid core and semi-rigid connections in the global stability of precast structures. In the study, it was considered a structure with and without rigid core, where was varied the value of the rotation restriction factor α_R of beam-column and the number of floors of the building. Thus, it's was possible to identify the influence of these devices on the in global stability of the structure through the analysis of the values of γ_Z , horizontal displacement, bending moments at the base of the column, negative and positive bending moments on the beam. It was possible to realize that the higher, the structure the structure will need a greater rotation restriction factor α_R of beam-column connections to stay stable. However, the addition of the rigid core to the structure allowed a decrease of the rotation restriction factor α_R to ensure the stability of the structure.

Keywords: Precast Structure, global stability, semirrigid connections, rigid core.

¹ Professor Mestre – Instituto Federal de Goiás – Campus Uruaçu, Uruaçu, Goiás.

² Graduado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Goiás – Campus Uruaçu, Uruaçu, Goiás.

³ Graduado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Goiás – Campus Uruaçu, Uruaçu, Goiás.

INTRODUÇÃO

A industrialização é um processo presente na história da humanidade caracterizado pelo aumento da produção e da produtividade. O setor da construção civil é considerado um segmento atrasado quando comparado com outros setores, como por exemplo, o automobilístico e o de comunicação. Desta maneira, a utilização de estruturas pré-moldadas de concreto se mostram como uma alternativa importante para se obter a racionalização e industrialização do setor da construção civil.

Segundo Mota (2009), as estruturas pré-moldadas eram utilizadas inicialmente em obras de pequeno porte, tal como galpões e depósitos. Marin (2009) afirma que isso é uma consequência de o fato deste sistema estrutural ser predominantemente isostático, ou seja, com a presença de ligações articuladas, onde o aumento da altura do edifício pode provocar um acréscimo na instabilidade do mesmo.

Nesse caso, a estabilidade global da estrutura pode ser melhorada através de alguns artifícios, como o enrijecimento das ligações viga-pilar ou através da utilização de sistemas de contraventamento, como por exemplo, o núcleo rígido. A utilização destes artifícios permite, ainda, um aumento na altura total do edifício sem que o mesmo se torne instável.

Desta forma, o ideal é encontrar a menor rigidez necessária para que as ligações sejam capazes de garantir a estabilidade da estrutura, podendo utilizar sistemas de contraventamento, como núcleo rígido, com o intuito de diminuir ainda mais a rigidez das ligações.

Estabilidade Global

A estabilidade global de uma estrutura pode ser entendida, de acordo com Costa (2015), como a capacidade que a estrutura tem de permanecer em equilíbrio quando solicitada pelas ações que atuam na mesma. Sua verificação é de extrema importância tanto para estruturas monolíticas de concreto armado quanto para estruturas pré-moldadas de concreto, pois, para Moncayo (2011), sua análise permite verificar e garantir a segurança da estrutura frente ao estado limite último de instabilidade, que é uma representação da perda da capacidade resistente da estrutura, causada pelo aumento das deformações sofridas devido as ações atuantes.

Para que seja garantida a estabilidade global de um edifício, faz-se necessário a análise dos efeitos de segunda ordem. De acordo com a ABNT NBR 6118:2014, os efeitos de segunda ordem são os efeitos adicionais que surgem quando a estrutura está em sua configuração deformada, somando-se aos efeitos de primeira ordem, que são os efeitos causados pelas ações

atuantes na estrutura ainda indeformada. Os efeitos de segunda ordem são classificados em três: globais, locais e localizados.

De acordo com a magnitude dos esforços de segunda ordem, a ABNT NBR 6118:2014 classifica a estrutura em dois tipos: nós fixos ou nós móveis. Essa classificação está diretamente relacionada com os deslocamentos dos nós causados pelos esforços de primeira ordem. Quando os deslocamentos dos nós são pequenos e os efeitos de segunda ordem são inferiores a 10% dos esforços de primeira ordem, o efeito global de segunda ordem pode ser desprezado e a estrutura é classificada como sendo uma estrutura de nós fixos. Caso contrário, se a mesma possuir deslocamentos horizontais significantes e a parcela do efeito de segunda ordem for superior a 10% dos esforços de primeira ordem, a estrutura recebe a classificação de nós móveis e todos os efeitos devem ser considerados na análise estrutural do edifício.

Parâmetros para avaliação da estabilidade global

Segundo Lins (2013), a análise dos efeitos de segunda ordem de uma estrutura apresenta um grau de complexidade superior quando comparada a análise dos efeitos de primeira ordem. Para os casos onde os efeitos de segunda ordem devem ser considerados, a ABNT NBR 6118:2014 apresenta duas formas de verificar a estabilidade global de uma estrutura: parâmetro de instabilidade α e o coeficiente γ_z .

Ambos os parâmetros acima citados permitem, de maneira simplificada, realizar a verificação da estabilidade global da estrutura, permitindo classificar a estrutura com nós fixos ou nós móveis. Entretanto, apenas o parâmetro coeficiente γ_z possibilita estimar os esforços globais de segunda ordem a partir dos esforços de primeira ordem, sem que sejam necessárias análises mais complexas.

Para definir a expressão do coeficiente, a ABNT NBR 6118:2014 relaciona o momento de tombamento da estrutura ($M_{1,tot,d}$), que é a soma dos momentos causados por todas as ações horizontais atuantes na estrutura de acordo com a combinação adotada, com a parcela dos momentos oriundos das ações verticais que atuam na estrutura devido aos deslocamentos sofridos pela estrutura após os efeitos de primeira ordem ($\Delta M_{tot,d}$), através da equação (1).

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

A ABNT NBR 6118:2014 classifica uma estrutura como sendo de nós fixos quando o valor de γ_z é inferior a 1,10, e de nós móveis quando o valor de γ_z está entre 1,10 e 1,30.

Não-linearidade física

Na consideração dos deslocamentos horizontais e verticais que ocorrem na estrutura, deve-se atentar para os efeitos causados pela não-linearidade física dos elementos estruturais, que está diretamente relacionada com o comportamento do material utilizado. No caso do concreto armado, Pinto e Ramalho (2002) afirmam que por se tratar de um material não elástico, devido a fissuração e a fluência do concreto e o escoamento da armadura, o mesmo acaba apresentando um comportamento não-linear, chamado de não-linearidade física.

Os efeitos decorrentes da não-linearidade física podem ser considerados na análise estrutural de um projeto de diversas maneiras, dentre elas com a utilização de métodos simplificados. Este método é baseado na utilização de coeficientes redutores de rigidez para cada elemento estrutural, dado pela ABNT NBR 6118:2014. Os valores destes coeficientes redutores de rigidez são apresentados na tabela (1) abaixo.

Tabela 1 – Coeficientes redutores de rigidez.

Elemento estrutural	Rigidez secante	Condição
Lajes	$(EI)_{sec} = 0,3E_{cs}I_c$	Nenhuma
Vigas	$(EI)_{sec} = 0,4E_{cs}I_c$	$A_{sc} \neq A_{st}$
	$(EI)_{sec} = 0,5E_{cs}I_c$	$A_{sc} = A_{st}$
Pilares	$(EI)_{sec} = 0,8E_{cs}I_c$	Nenhuma

onde:

E_{cs} é o módulo de deformação secante do concreto;

I_c é o momento de inércia da seção bruta de concreto;

A_{st} é a área da seção transversal da armadura longitudinal de tração; e

A_{sc} é a área da seção transversal da armadura longitudinal de compressão.

Fonte: ABNT NBR 6118:2014 – “Adaptada pelos autores”

Não-linearidade geométrica

Os efeitos da não-linearidade geométrica são causados pelas deformações dos elementos estruturais quando submetidos aos carregamentos de projeto. Pinto e Ramalho (2002) definem essas deformações como sendo as mudanças de posição da estrutura no espaço.

Por isso, Lins (2013) relaciona os efeitos da não-linearidade geométrica aos deslocamentos e às deformações da estrutura. Sendo assim, os efeitos dessa não-linearidade devem ser considerados em edifícios com grande número de pavimentos, onde a estrutura está sujeita a deformações ocasionadas pelo carregamento e, também, pela ação dos ventos.

Uma das maneiras de levar em consideração os efeitos da não-linearidade geométrica na análise da estabilidade global de uma estrutura é, segundo a ABNT NBR 6118:2014, através da utilização do coeficiente γ_z , usado para majorar os esforços de primeira ordem.

Ligação semirrígida em estruturas pré-moldadas de concreto

O sistema estrutural de concreto pré-moldado exige a execução de ligações entre seus elementos estruturais, uma vez que as vigas, lajes e pilares são fabricados separadamente e fora de seu local de utilização definitiva. Essas ligações podem ser feitas com o uso de chumbadores, soldas, traspasse de armadura e entre outros tipos. De acordo com Meireles Neto (2012), as ligações entre os elementos pré-moldados de concreto devem ser confeccionadas de maneira que sejam capazes de transmitir esforços, restringir movimentos e, o mais importante, promover a estabilidade global da estrutura em questão.

Quanto ao tipo de vinculação nas ligações viga-pilar, é possível classificar tais ligações em três tipologias distintas: rígida, articulada e semirrígida. A ligação rígida é aquela que garante restrição absoluta dos deslocamentos e permitem total transferência de esforços entre os elementos estruturais. Por outro lado, as ligações articuladas permitem apenas uma rotação relativa entre os elementos sem transferir nenhuma parcela dos esforços entre os elementos estruturais. Já a terceira classificação é uma situação intermediária entre o comportamento rígido e o articulado, chamada de ligação semirrígida que, de acordo com Marin (2009), permite tanto a rotação relativa entre os elementos conectados quanto a redistribuição de esforços pela estrutura de maneira parcial.

De acordo com Lins (2013), o bom comportamento da estrutura pré-moldada de concreto está intimamente relacionada à rigidez das ligações entre vigas e pilares. Desta maneira, é notável que a melhor opção para garantir o perfeito funcionamento da estrutura seria o que apresentasse ligações rígidas, porém não seria a solução mais viável. À medida que se aumenta a rigidez de uma ligação viga-pilar aumenta, também, os trabalhos e os recursos necessários para a execução de tais ligações, podendo comprometer as vantagens inerentes ao sistema construtivo de concreto pré-moldado. Deste modo, conforme Marin (2009), as estruturas de múltiplos pavimentos com elementos pré-moldados de concreto possuem as ligações com comportamento semirrígido, pois são mais simples de serem executadas do que as rígidas e aumentam a rigidez da estrutura como um todo.

Fator de restrição α_R

De acordo com ABNT NBR 9062:2006, o fator de restrição α_R é um parâmetro que relaciona as rigidezes da ligação e do elemento estrutural que está conectada. Este fator varia de 0 a 1 representando os casos extremos de uma ligação: a situação articulada e a perfeitamente rígida, respectivamente. O fator de restrição, apresentado na equação (2), relaciona a rigidez secante da viga que está conectada a ligação (EI_{sec}) e o comprimento efetivo da viga (L_{ef}) com a rigidez secante ao momento fletor da ligação viga-pilar (R_{sec}).

$$\alpha_R = \frac{1}{1 + \frac{3EI_{sec}}{R_{sec}L_{ef}}} = \frac{\theta_1}{\theta_2} \quad (2)$$

Ferreira, El Debs e Elliot (2002) propuseram uma classificação da rigidez das ligações em cinco zonas de acordo com o fator de restrição α_R : articulada; semirrígida com baixa, média e alta restrição; e perfeitamente rígida, conforme a tabela (2) abaixo.

Tabela 2 – Classificação das ligações em estruturas pré-moldadas.

Zonas	Fator de restrição α_R	Grau de engastamento	Classificação das ligações
I	$0 \leq \alpha_R < 0,14$	$0 \leq \alpha_R < 20\%$	Articuladas
II	$0,14 \leq \alpha_R < 0,40$	$20\% \leq \alpha_R < 50\%$	Semirrígida com baixa restrição
III	$0,40 \leq \alpha_R < 0,67$	$50\% \leq \alpha_R < 75\%$	Semirrígida com média restrição
IV	$0,67 \leq \alpha_R < 0,86$	$75\% \leq \alpha_R < 90\%$	Semirrígida com alta restrição
V	$0,86 \leq \alpha_R < 1,00$	$90\% \leq \alpha_R < 100\%$	Perfeitamente rígidas

Fonte: Ferreira, El Debs e Elliot (2002).

Como visto na tabela (2) acima, é possível definir os limites das zonas de classificação com o uso do grau de engastamento da ligação. O grau de engastamento (M_E/M_R) relaciona o momento negativo na extremidade da viga quando comparado ao momento negativo de engaste perfeito, podendo ser expresso em função do fator de restrição α_R pela equação (3).

$$\frac{M_E}{M_R} = \frac{3\alpha_R}{2 + \alpha_R} \quad (3)$$

Núcleo Rígido

O núcleo rígido é um sistema de contraventamento bastante utilizado em edifício de múltiplos pavimentos. A ABNT NBR 6118:2014 define sistema de contraventamento como

sendo uma estrutura de elevada rigidez capaz de resistir às ações horizontais que atuam na estrutura. Van Acker (2003) afirma que a adoção do núcleo rígido é uma solução eficaz para garantir a estabilidade global da estrutura, uma vez que sua utilização se adapta facilmente ao modelo arquitetônico do edifício, pois podem ser executados nas caixas de elevadores e escadas, fazendo com que os custos adicionais para a estabilização da estrutura sejam praticamente desprezíveis.

Segundo Van Acker (2003), a elevada rigidez deste núcleo retira a responsabilidade das ligações viga-pilar de garantirem que a estrutura permaneça estável e acaba por contraventar os demais pilares. Isso pode ser explicado por Santis (2009), que diz que as ligações necessitarão de uma menor rigidez, podendo até apresentar comportamento articulado, e os pilares serão responsáveis apenas por suportar as ações verticais que atuam na estrutura, facilitando o processo executivo da estrutura como um todo.

Ainda de acordo com Van Acker (2003), para que o núcleo rígido contribua de forma plena com a estabilidade global do edifício, é necessário que as forças horizontais que atuam na estrutura sejam transmitidas para o núcleo central através do efeito diafragma das lajes. Define-se diafragma como uma estrutura horizontal plana capaz de permitir da transferência das ações horizontais que atuam em pontos distintos da estrutura para o núcleo rígido.

METODOLOGIA

Inicialmente foi feita uma revisão bibliográfica sobre o tema, abrangendo tópicos como: estabilidade global em estruturas de concreto armado pré-moldada e monolítica; ligações semirrígidas em estruturas pré-moldadas; e núcleo rígido como sistema de contraventamento para edifícios de múltiplos pavimentos. Além disso, foi feito um estudo procurando conhecer o programa Eberick ® e suas funcionalidades.

O segundo passo consistiu em encontrar um modelo arquitetônico simples (Figura 1) e que atenda às necessidades do presente estudo. Encontrado o modelo, foi realizado o lançamento estrutural do mesmo com o intuito de estabilizar sua estrutura para um edifício de 20 pavimentos, com a utilização de ligações perfeitamente rígidas. As dimensões das vigas, lajes e pilares obtidos com o lançamento estrutural do edifício de 20 pavimentos foram mantidas para todas as iterações, com o objetivo de verificar apenas a influência do fator de restrição à rotação da ligação viga-pilar na estabilidade global da estrutura.

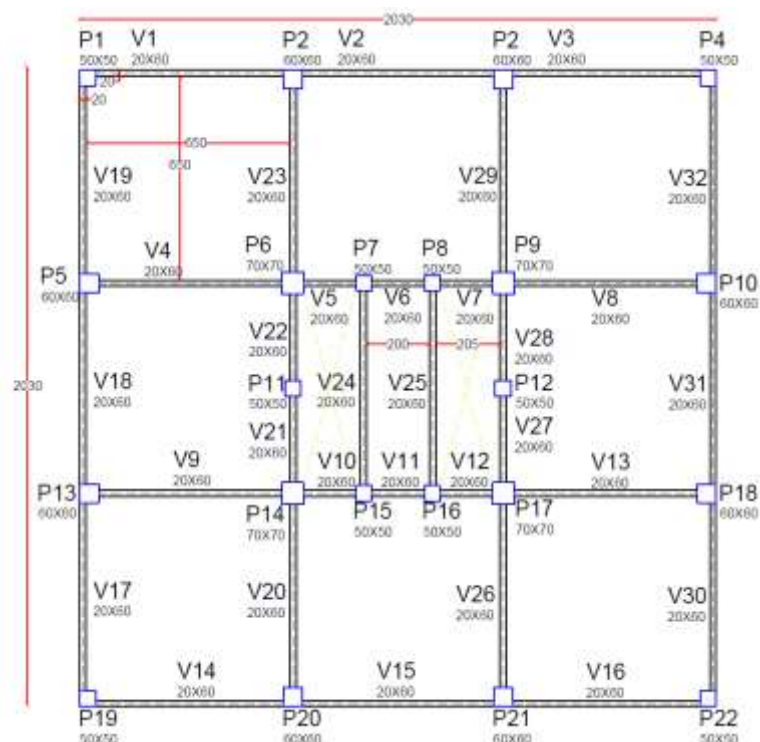


Figura 1 – Planta de formas do pavimento tipo, estrutura aporcionada.

Fonte: os Autores.

Com o edifício estabilizado, foram identificados os elementos estruturais que serviram de parâmetros para a análise dos resultados. A próxima etapa consistiu em variar o fator de restrição de todas as ligações viga-pilar e, também, a quantidade de pavimentos do edifício procurando identificar como essa variação afetou o comportamento da estrutura, através de parâmetros como: coeficiente γ_z , deslocamento horizontal, momento negativo da viga, momento positivo da viga e momento na base do pilar. É importante mencionar que não foi utilizada uma tipologia específica de ligação viga-pilar, sendo levado em consideração apenas o fator de restrição à rotação das mesmas.

Os valores do fator de restrição α_R utilizados são os que definem os limites da classificação das ligações proposta por Ferreira, El Debs e Elliot (2002), que são: 1,00; 0,86; 0,67; 0,40; 0,14 e 0,00. Já o número de pavimentos foi reduzido de 2 em 2, até a quantidade mínima de 4 pavimentos.

A etapa seguinte consistiu em adicionar um núcleo rígido à estrutura (Figura 2) e realizar todas as iterações novamente, procurando identificar como o núcleo rígido afetou a estabilidade da estrutura em questão e se ele permitiu uma redução do fator de restrição α_R das ligações viga-pilar da estrutura.

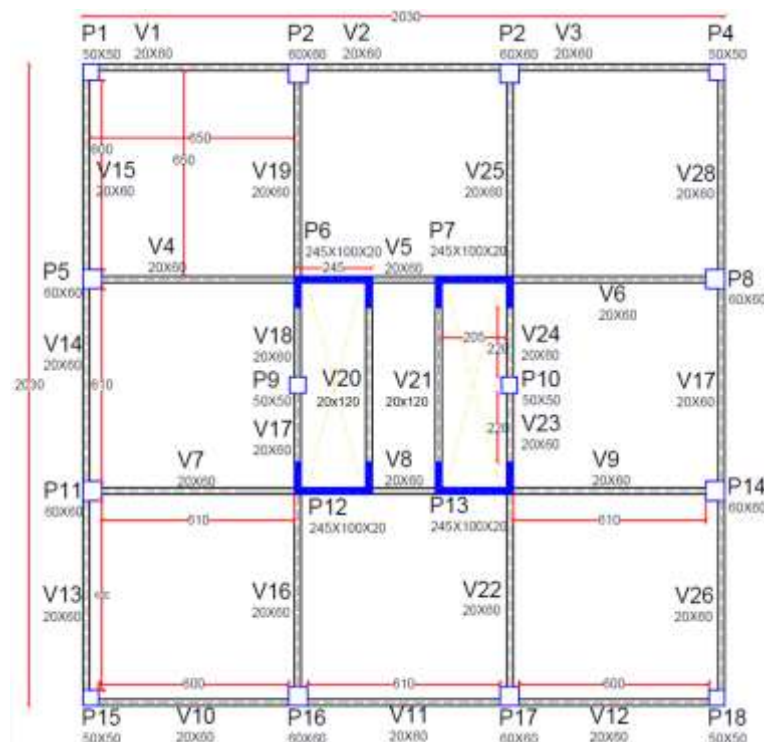


Figura 2 – Planta de formas do pavimento tipo, estrutura com núcleo rígido.

Fonte: os Autores.

No total foram realizadas 108 simulações, obtendo o modelo tridimensional (Figura 3), e os resultados serão comparados entre si.

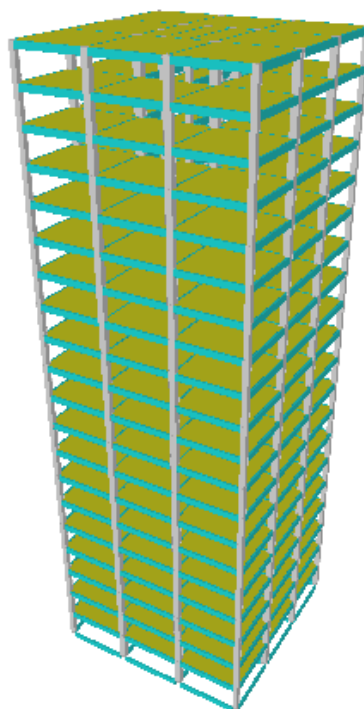


Figura 3 – Modelo tridimensional do objeto de estudo.

Fonte: os Autores.

Projeto

O projeto desenvolvido é um prédio comercial com planta baixa do pavimento térreo e tipo. O pavimento térreo possui uma recepção e cinco escritórios com 48 m² cada, onde todos possuem dois banheiros em uma cozinha. Já o pavimento tipo possui seis escritórios com 48 m² cada, com as mesmas configurações do pavimento térreo. O edifício possui pé-direito de três metros, quatro elevadores e uma escada, desenvolvido com o intuito de garantir a maior simetria possível.

Parâmetros de projeto

Para efeitos de dimensionamento estrutural, foram considerados os parâmetros apresentados na tabela (3) abaixo:

Tabela 3 – Parâmetros utilizados.

NFL	Pilar	0,80EI
	Viga	0,40EI
	Laje	0,30EI
Concreto		30 MPa
Classe de Agressividade		II
Vento	Velocidade	35 m/s
	S1	1,0
	S2	variável com a altura do edifício
	S3	1,0
Sobrecarga	Pav. Tipo	2,0 kN/m ²
	Cobertura	0,5 kN/m ²
Revestimento	Pav. Tipo	1,6 kN/m ²
	Cobertura	0,6 kN/m ²

Fonte: os Autores.

Foram utilizadas lajes nervuradas de espessura de 35 cm para as lajes do pavimento térreo e tipo e lajes nervuradas de 25 cm de espessuras nas lajes de cobertura, com o intuito de simular o funcionamento de lajes alveolares, tipologia mais utilizada em edifícios com estruturas pré-moldadas de concreto.

Após realizar a primeira simulação, definiu-se de qual parte da estrutura seriam extraídos os dados para a análise. Os elementos estruturais que serviram de parâmetro de análise da estrutura aporricada foram: o pilar P21 e a viga V23.

O núcleo rígido adicionado a estrutura é composto por quatro pilares em “U” (P6, P7, P12 e P13) e duas vigas de travamento (V20 e V21) com seção transversal de 20x120cm. Os

elementos estruturais analisados nesta etapa foram: pilar P17 e a viga V19, sendo equivalentes aos mesmo elementos estruturais da estrutura aperticada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resultados das simulações sem núcleo rígido

Inicialmente, é importante destacar que algumas iterações não foram possíveis de serem realizadas. O motivo desta limitação é que a estrutura atingia determinado grau de instabilidade, que por sua vez impossibilitou realizar os demais cálculos. Desta forma, para esta configuração o programa não forneceu os outros resultados para as seguintes situações:

- 14, 16, 18 e 20 pavimentos para fator de restrição menores que 0,40; e
- 4, 6, 8, 10 e 12 pavimentos para fator de restrição menores que 0,14.

Com base nas simulações realizadas, foi possível construir o gráfico abaixo (Figura 4), que mostra como o valor do coeficiente γ_z variou de acordo com o fator de restrição α_R , para os diferentes números de pavimentos analisados. É possível notar que houve um aumento no valor do coeficiente γ_z à medida que diminuía o fator de restrição das ligações.

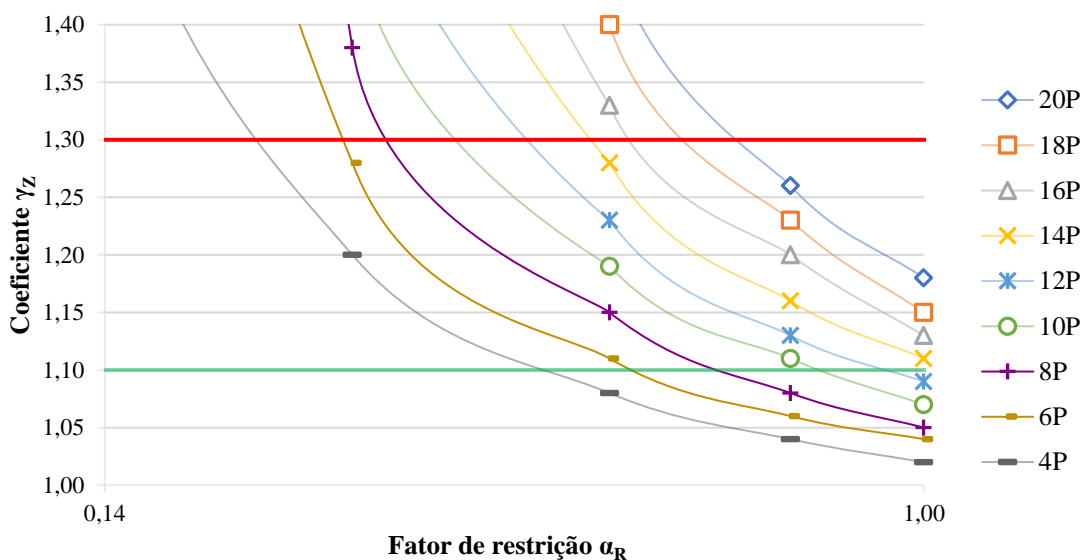


Figura 4 - Coeficiente γ_z X Fator de restrição α_R .

Fonte: os Autores.

Dos resultados obtidos, percebe-se que as estruturas de 14, 16, 18 e 20 pavimentos sempre foram classificadas como estrutura de nós móveis, independentemente do fator de restrição α_R adotado nas ligações viga-pilar. Já os edifícios de 4, 6, 8, 10 e 12 pavimentos começaram como estruturas de nós fixos, mas em instantes diferentes passaram a ser estruturas de nós móveis. Essa análise teve como base as linhas horizontais verde e vermelha que representam os limites que classificam a estrutura em nós fixos ou nós móveis, respectivamente.

Com os resultados obtidos na análise do deslocamento horizontal da estrutura, foi possível realizar uma aproximação e encontrar o menor valor possível do fator de restrição α_R que permite que a estrutura tenha um deslocamento menor que o limite estipulado pela norma. Estes dados são apresentados na tabela (4) abaixo, que mostra, também, a classificação de cada tipo de ligação viga-pilar mencionada.

Tabela 4 - Fator de restrição mínimo que garante deslocamento menor que o limite normativo.

Número de pavimentos	Deslocamento limite (cm)	α_{Rmin}	Classificação da ligação
20	5,00	0,66	Ligação semirrígida com média restrição
18	4,50	0,61	
16	4,00	0,56	
14	3,50	0,45	
12	3,00	0,37	Ligação semirrígida com baixa restrição
10	2,50	0,27	
8	2,00	< 0,14	Ligação articulada
6	1,50	< 0,14	
4	1,00	< 0,14	

Fonte: os Autores.

A variação do momento negativo e positivo na viga V23 em função do fator de restrição α_R são apresentados nos gráficos das (Figura 5 e 6) respectivamente. É importante lembrar, que como foi dito anteriormente, algumas das iterações não apresentaram resultados e, desta forma, apenas os dados obtidos serão analisados.

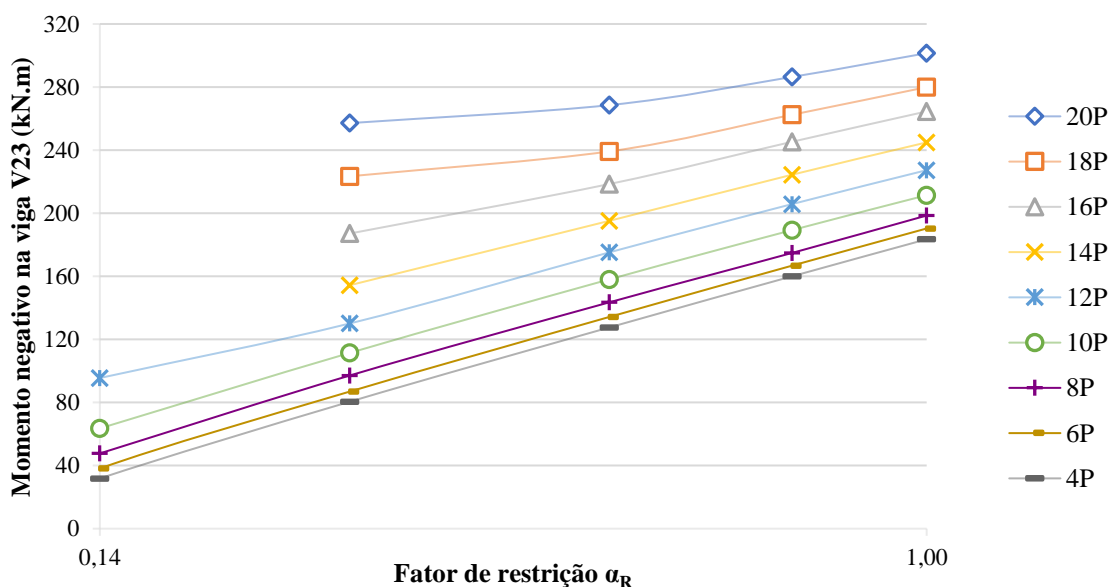


Figura 5 – Momento negativo na viga V23 X Fator de restrição α_R .

Fonte: os Autores.

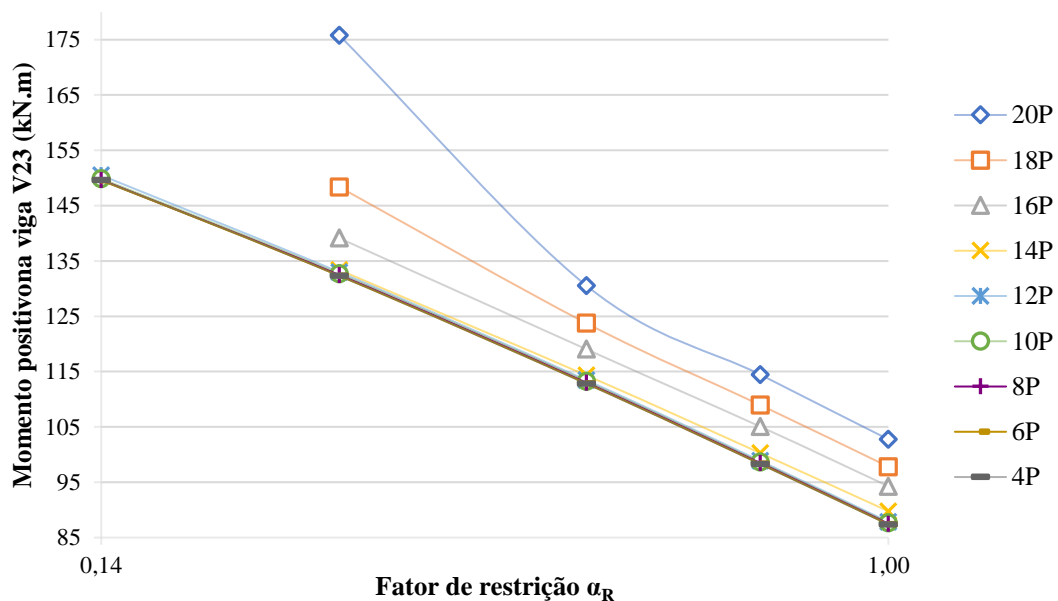


Figura 6 – Momento positivo na viga V23 X Fator de restrição α_R .

Fonte: os Autores.

Pelo gráfico apresentado (Figura 6), é possível notar que os valores de momento positivo para os edifícios de 4 a 14 pavimentos possuem quase os mesmos valores, variando muito pouco quando comparada uma iteração com a outra. Isso se deve ao fato de que até esta quantidade de pavimentos, a combinação crítica de esforços era referente às ações verticais, enquanto que nas demais a combinação crítica era referente às ações horizontais atuantes na estrutura, ou seja, o vento.

Já o momento negativo na extremidade da viga diminuiu ao passo em que diminuía o fator de restrição α_R das ligações da estrutura, ao contrário do momento positivo, que aumentou com a diminuição do fator de restrição α_R .

O gráfico abaixo, (Figura 7), mostra como o momento na base do pilar P21 do edifício aumentou à medida que diminuía o fator de restrição α_R . Para os edifícios de 14, 16, 18 e 20 pavimentos é possível notar um aumento expressivo quando o valor do fator de restrição passa de 0,67 para 0,40, no trecho onde a ligação semirrígida é considerada de média restrição. Já nas estruturas de 4, 6, 8, 10 e 12 pavimentos este aumento significativo ocorre no intervalo de 0,40 para 0,14.

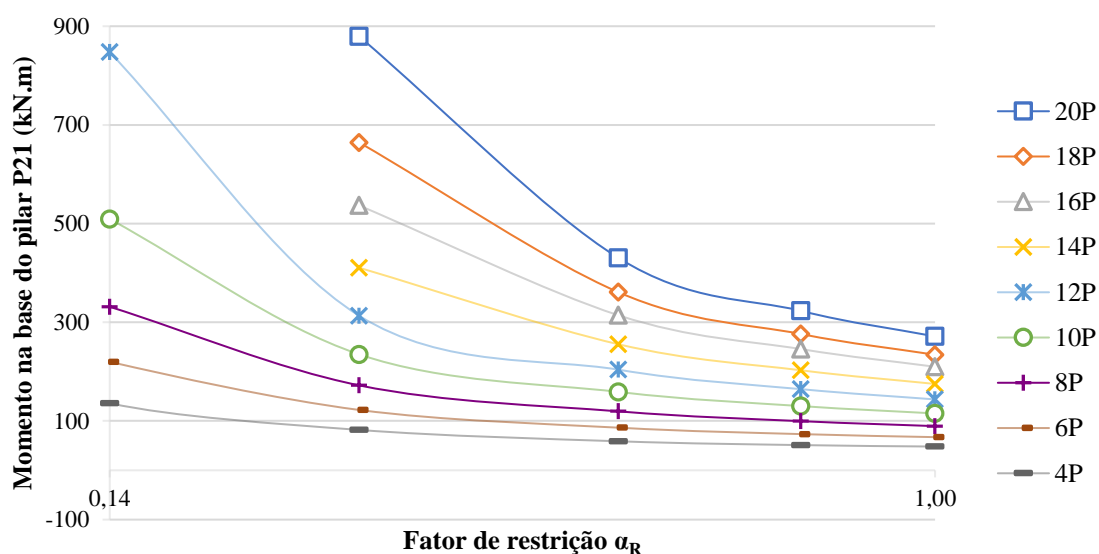


Figura 7 – Momento na base do pilar P21 X Fator de restrição α_R .

Fonte: os Autores.

Confirma, então, que ao diminuir o fator de restrição α_R está reduzindo a contribuição das ligações na estabilidade global do edifício, passando tal função para os pilares. Tomando a edificação com 12 pavimentos como exemplo, percebe-se que houve um aumento de mais de 600% no valor do momento na base do pilar analisado, quando as ligações passaram de perfeitamente rígidas para o limite superior das ligações articuladas. Este acréscimo no valor do momento acarretaria um aumento da seção transversal do pilar e fundação para que ambos suportem tal esforço de maneira adequada e consiga garantir a estabilidade global deste prédio com este tipo de ligação.

Resultados das simulações com núcleo rígido

Da mesma maneira que ocorreu na estrutura sem núcleo rígido, algumas iterações não foram possíveis de serem realizadas devido ao grau de instabilidade da mesma.

O gráfico abaixo, (Figura 8), mostra como o valor do coeficiente γ_z variou com a diminuição do fator de restrição α_R das ligações, agora no modelo com núcleo rígido. Da mesma maneira que na estrutura aporticada, o coeficiente γ_z tendeu a aumentar à medida que o fator de restrição foi reduzido. As linhas vermelha e verde indicadas no gráfico referem-se aos limites do valor de γ_z para estruturas de nós móveis, de acordo com a classificação da NBR 6118:2014.

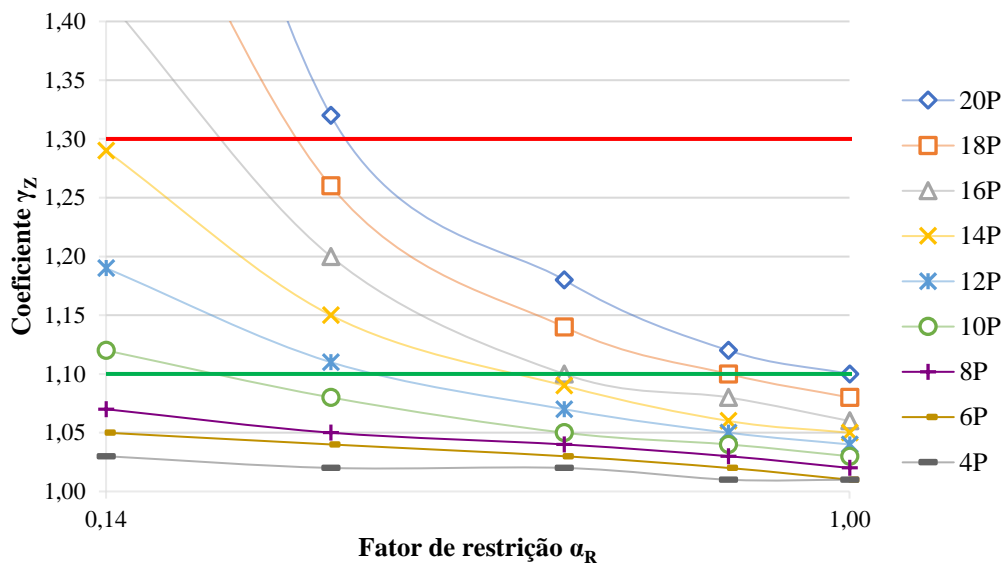


Figura 8 – Coeficiente γ_z X Fator de restrição α_R .

Fonte: os Autores.

Analisando os resultados apresentados no gráfico acima, (Figura 8), percebe-se que inicialmente todas as iterações eram consideradas de nós fixos, mas com a diminuição do fator de restrição α_R elas passaram a ser classificadas como nós móveis em diferentes momentos para cada uma das simulações, até o ponto em que todas as estruturas se tornaram instáveis.

Comparando os resultados obtidos na estrutura com e sem núcleo rígido, (Figura 9), através de uma aproximação, é possível perceber a diminuição do fator de restrição necessário para garantir a estabilidade da estrutura que, conseqüentemente, acabou precisando de uma ligação viga-pilar de menor rigidez quando na presença do núcleo rígido.

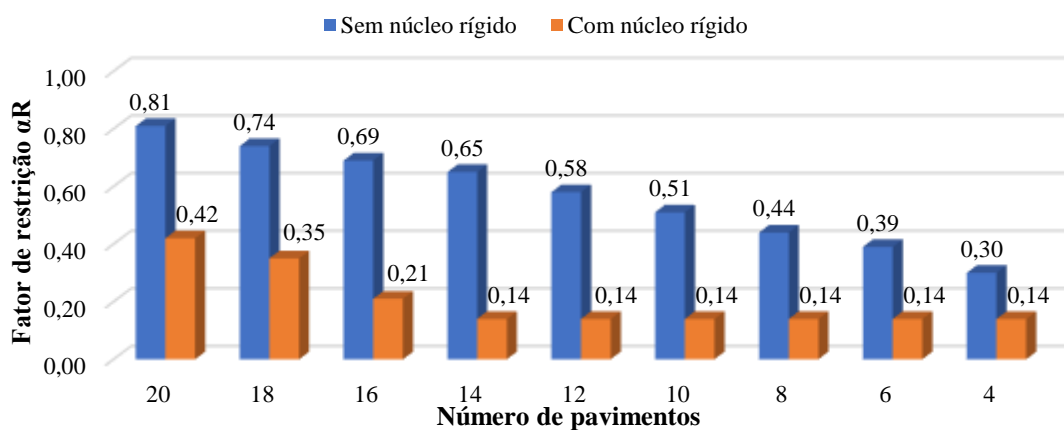


Figura 9 - Fator de restrição α_R mínimo das simulações com e sem núcleo rígido para $\gamma_z < 1,30$.

Fonte: os Autores.

Desta forma, acaba-se confirmando a premissa de que a presença do núcleo rígido na estrutura retira, de maneira parcial, a responsabilidade das ligações viga-pilar de garantirem a estabilidade global da mesma, deixando as ligações mais simples de serem executadas.

Na análise do deslocamento horizontal no topo da estrutura com o núcleo rígido, identificou-se o fator de restrição α_R mínimo das ligações viga-pilar que garantissem que o deslocamento no topo do edifício fosse menor que o definido pela ABNT NBR 9062:2006, apresentados na tabela (5) abaixo.

Tabela 5 – Fator de restrição α_R de acordo com o deslocamento limite da ABNT NBR 9062:2006.

Número de pavimentos	Deslocamento limite (cm)	$\alpha_{R\text{mín}}$	Classificação das ligações
20	5,00	0,35	Semirrígida com baixa restrição
18	4,50	0,28	
16	4,00	0,16	
14	3,50	< 0,14	
12	3,00	< 0,14	Articulada
10	2,50	< 0,14	
8	2,00	< 0,14	
6	1,50	< 0,14	
4	1,00	< 0,14	

Fonte: os Autores.

A tabela (6) mostra como a presença do núcleo rígido influenciou na diminuição do deslocamento horizontal no topo da estrutura. Para isso, a análise foi feita levando em consideração os resultados obtidos com as iterações com fator de restrição α_R igual a 0,40, que corresponde ao pior caso que pode ser comparado entre as simulações com e sem núcleo rígido. Desta maneira, é notável a redução do deslocamento da estrutura após a adição do núcleo rígido.

Tabela 6 – Comparativo dos deslocamentos para as simulações com e sem núcleo rígido ($\alpha_R = 0,40$).

Número de pavimentos	Sem núcleo		Com Núcleo	
	$\alpha_{R\text{mín}}$	Deslocamento (cm)	$\alpha_{R\text{mín}}$	Deslocamento (cm)
20	0,66	14,02	0,35	4,10
18	0,61	9,03	0,28	2,86
16	0,56	6,11	0,16	2,01
14	0,45	3,8	0,14	1,26
12	0,37	2,27	0,14	0,74
10	0,27	1,25	0,14	0,38
8	0,14	0,61	0,14	0,17
6	0,14	0,24	0,14	0,05
4	0,14	0,06	0,14	0,01

Fonte: os Autores.

Os gráficos a seguir, (Figuras 10 e 11), mostram a variação dos momentos positivos e negativos na viga V19, respectivamente, em função do fator de restrição α_R . Vale ressaltar que a viga agora analisada é a V19, que é equivalente a viga V23 da estrutura sem núcleo rígido.

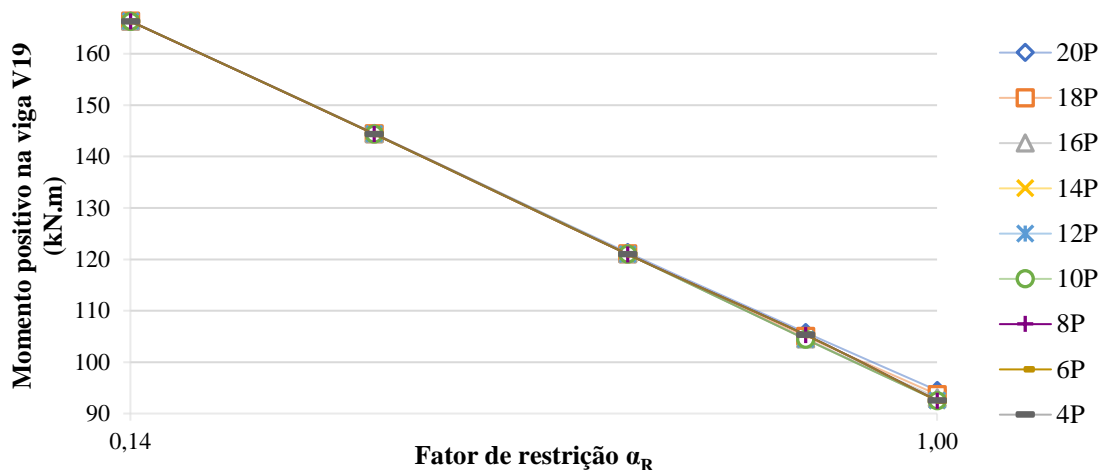


Figura 10 – Momento positivo na viga V19 X Fator de restrição α_R .

Fonte: os Autores.

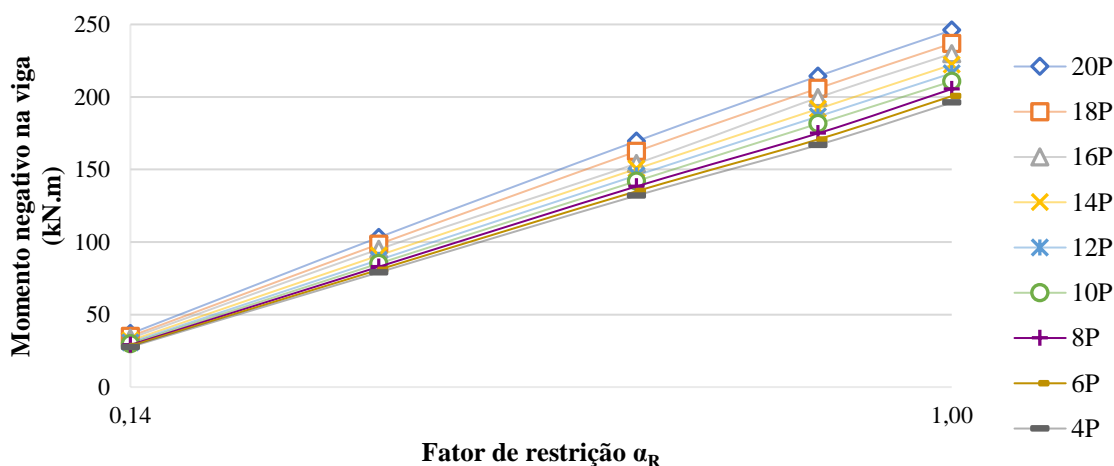


Figura 11 – Momento negativo na viga V19 X Fator de restrição α_R .

Fonte: os Autores.

Assim como esperado, novamente com a diminuição do fator de restrição das ligações, houve, simultaneamente, um aumento do momento positivo da viga e uma diminuição do momento negativo da mesma.

O momento positivo não apresentou variação significativa quando se confronta os resultados de uma simulação com a outra. Neste caso, o núcleo rígido adicionado à estrutura passou a resistir as ações laterais atuantes no edifício e a combinação crítica de esforços se dá devido às as ações verticais na viga analisada em todas as simulações.

No gráfico abaixo (Figura 12), é demonstrado o efeito causado no momento na base do pilar P17 à medida em que se diminuiu o fator de restrição α_R . A mudança do pilar analisado se deve da mudança da estrutura após a adição do núcleo rígido, sendo o P17 o novo pilar com a situação mais crítica na atual estrutura.

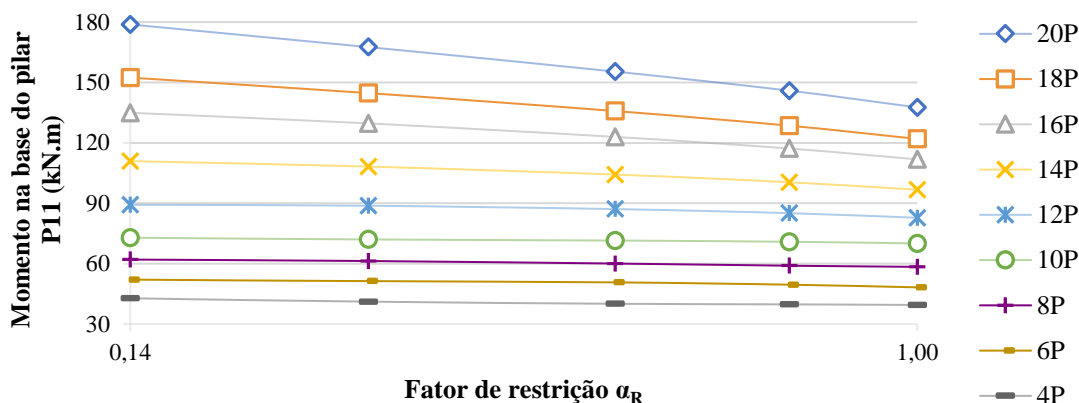


Figura 12 – Momento na base do pilar P17 X Fator de restrição α_R .

Fonte: os Autores.

Mais uma vez, como previsto, a redução do fator de restrição α_R causou um aumento no momento na base do pilar em proporções distintas para as diferentes simulações, sendo maior a variação nas estruturas com mais pavimentos.

A principal diferença entre a estrutura com e sem núcleo rígido é a ordem de grandeza dos valores apresentados. A Figura 13 mostra a diferença do momento na base do pilar para ambas situações, sem e com núcleo rígido. Para isso, foram levados em consideração os valores obtidos nas simulações com fator de restrição α_R igual a 0,40.

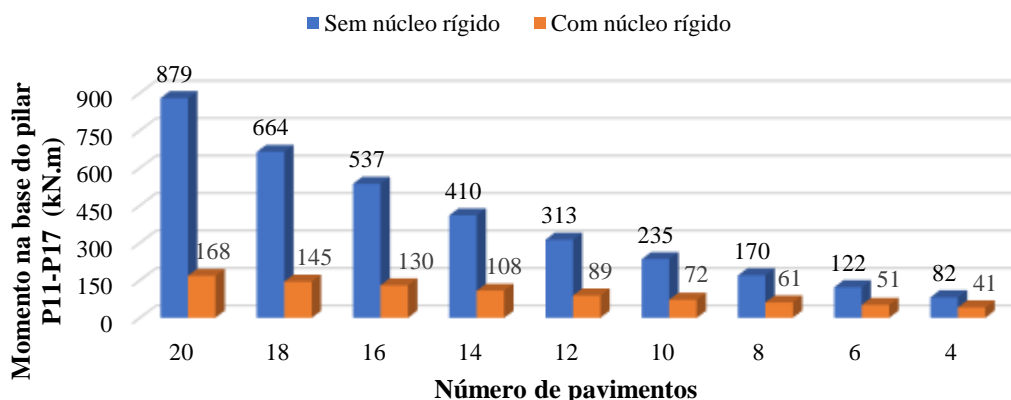


Figura 13 – Comparativo do momento na base do pilar entre simulações com e sem núcleo rígido.

Fonte: os Autores.

No caso da estrutura apertada de 20 pavimentos, o momento na base do pilar era de 879 kN.m, enquanto que na mesma situação, mas com a presença do núcleo rígido, passou para 168 kN.m, mostrando uma redução de 81% no seu valor. Esta redução ocorre devido o núcleo rígido ser o responsável por restringir o deslocamento da estrutura, além de diminuir o momento fletor na base dos pilares analisados. Isso mostra mais uma vez a eficiência do núcleo rígido em elevar a rigidez do edifício e garantir a estabilidade global da estrutura.

CONCLUSÃO

O presente trabalho procurou analisar a influência das ligações semirrígidas e do sistema de contraventamento por núcleo rígido na estabilidade global da estrutura. Através do estudo realizado é possível concluir que a rigidez à flexão das ligações viga-pilar desempenha um papel de suma importância na estabilidade global de uma estrutura pré-moldada, assim como o núcleo rígido. Dentre os principais pontos analisados, pode-se destacar os seguintes:

- Quanto mais alta a estrutura maior é sua deslocabilidade, que por sua vez, exige um maior fator de restrição α_R para garantir a estabilidade da mesma. Este fato pode ser observado na estrutura com e sem núcleo rígido;

- A presença do núcleo melhora consideravelmente a estabilidade global da estrutura, através da diminuição dos deslocamentos horizontais. Tomando como base o fator de restrição α_R das ligações viga-pilar necessário para estabilizar a estrutura, seu valor é bem menor do que o necessário para a estrutura sem núcleo. Como por exemplo, pode-se citar o edifício de 20 pavimentos que com a adição do núcleo rígido apresentou uma redução de aproximadamente 47% no fator de restrição α_R necessário para se garantir a estabilidade global do mesmo;

- A presença do núcleo rígido permite que haja um aumento na quantidade de pavimentos do edifício sem que seja necessária a utilização de ligações rígidas. Já a estrutura sem núcleo rígido necessita de um aumento na seção transversal das vigas e dos pilares para que possa haver um aumento do número pavimentos e que a estabilidade seja garantida;

- Em relação aos momentos atuantes na viga, é possível notar que existe uma redistribuição dos mesmos, onde parte do momento negativo passa para o momento positivo, devido a redução do fator de restrição α_R da ligação viga-pilar. Essa redução no momento negativo acaba contribuindo para a facilidade executiva da ligação viga-pilar;

- A consideração das ligações semirrígidas permitiu uma redução do momento na base dos pilares quando comparado com utilização de ligações viga-pilar articuladas. Além disso, a

presença de ligações semirrígidas traz um aumento de produtividade para a obra, visto que ligações de menor rigidez são mais simples de serem executadas;

É fato que a presença das ligações semirrígidas e do núcleo rígido trazem melhorias para a estabilidade global do edifício. Dentre todas as vantagens trazidas por estes artifícios, faz-se necessário uma análise detalhada de cada ocasião, procurando identificar qual seria a alternativa mais viável para cada tipo de situação.

REFERÊNCIAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Carga para cálculo de estrutura de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento nas edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9062**: Projeto de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

BRITO, R. S. **Estruturas de concreto pré-fabricadas em edifícios de múltiplos pavimentos contraventados por núcleo de rigidez**. SEPA – Seminário Estudantil de Produção Acadêmica, v. 13, p. 286-299, 2014.

COSTA, R. R. R. **Otimização do Comportamento de sistemas estruturais pré-moldados de concreto com ligações viga-pilar deformáveis à flexão**. 2015. 103 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2015.

FERREIRA, M. A.; EL DEBS, M. K.; ELLIOT, K. S. **Modelo teórico para projeto de ligações semirrígidas em estruturas de concreto pré-moldado**. In: 44º Congresso Brasileiro de Concreto. Belo Horizonte: Ibracon, 2002.

LINS, F. F. V. **Contribuição à avaliação da estabilidade global e pré-dimensionamento de pórticos planos em concreto pré-moldado**. 2013. 203p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

MARIN, M. C. **Contribuição à análise da estabilidade global de estruturas de concreto pré-moldado de múltiplos pavimentos**. 2009. 213p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

MEIRELES NETO, M. **Estabilidade de edifícios de concreto pré-moldado com ligações semirrígidas**. 2012. 122p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

MONCAYO, W. J. Z. **Análise de segunda ordem global em edifícios de concreto armado**. 2011. 221p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

MOTA, J. E. **Contribuição ao projeto de estruturas multi-piso reticuladas em concreto pré-moldado**. 2009. 246p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

PINTO, R. S.; RAMALHO, M. A. **Não-linearidade física e geométrica no projeto de edifícios usuais de concreto armado**. Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, n.19, p. 171-206, 2002.

SANTIS, B. C. **Principais sistemas estruturais para edifícios de múltiplos pavimentos em concreto pré-fabricado**. 2009. 58p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

VAN ACKER, A. **Manual de sistemas pré-fabricados de concreto**. Tradução de Marcelo de Araújo Ferreira. São Paulo, ABCIC, 2003.

Recebido em 14 de fevereiro de 2018.

Aprovado em 30 de abril de 2018.