

SUBMETIDO 30/08/2021

APROVADO 22/09/2021

PUBLICADO ON-LINE 11/11/2021

PUBLICADO 10/07/2023

EDITOR ASSOCIADO
André Luís Christoforo

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id6325>

ARTIGO ORIGINAL

Considerações a respeito da determinação dos parâmetros de estabilidade através de processos simplificados em estruturas de concreto armado

 Daniel Torres Filho [1]*

[1] daniel.torres@ifpb.edu.br

Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB),
Campus Cajazeiras, Brasil

RESUMO: Os efeitos de segunda ordem surgem nas estruturas em função dos deslocamentos sofridos a partir da aplicação dos carregamentos. Esses efeitos podem ser significativos ou não. Para a determinação deles, é possível adotar processos simplificados ou sofisticados. Em alguns tipos de estruturas, devido ao seu arranjo estrutural, entre outras considerações, é possível que os processos tidos como simplificados possam não produzir resultados satisfatórios, como o coeficiente $GamaZ$. Para o engenheiro projetista, é necessário saber quando essa variação é decisiva e quanto isso pode significar para a estabilidade do edifício. Neste trabalho, foram avaliados edifícios com pavimentos apresentando simetria e assimetria em planta. A fim de avaliar os efeitos com relação à altura, foram estudados edifícios com cinco e dez pavimentos. Para cada tipo de edifício foram determinados os coeficientes $GamaZ$ para posterior comparação com outros parâmetros de estabilidade, como o $FAVt$ e o obtido mediante o uso do processo $P-\Delta$, em que ambos os processos consideram os efeitos das cargas verticais nas suas determinações. Como os efeitos da execução dos pavimentos podem ser contornados mediante o aumento da rigidez axial dos pilares, também foi avaliado o quanto esse artifício pode afetar na determinação dos efeitos de segunda ordem a partir dos processos simplificados. Após as análises, percebeu-se que o aumento na rigidez axial dos pilares não produziu alterações significativas entre os parâmetros de estabilidade. Pequenas variações foram observadas na comparação entre os parâmetros de estabilidade para os cenários analisados. A maior diferença entre os parâmetros surgiu quando o edifício apresentou assimetria em apenas uma direção.

Palavras-chave: coeficiente $GamaZ$; efeitos de segunda ordem; estabilidade global.

*Autor para correspondência.

Considerations of the determination of stability parameters through simplified processes in reinforced concrete structures

ABSTRACT: *Second order effects arise in the structures from the displacements suffered from the application of loads. These effects may or may not be significant. To determine these effects it is possible to adopt simplified or sophisticated processes. In some types of structures, due to their structural arrangement, among other considerations, it is possible that processes considered as simplified may not produce satisfactory results, such as the Γ_{m2} coefficient. For the design engineer, it is necessary to know when this variation is decisive and how much it can mean for the stability of the building. In this work, buildings with floors showing symmetry and asymmetry in plan were evaluated. In order to evaluate the effects with respect to height, buildings with five and ten floors were studied. For each type of building, the Γ_{m2} coefficients were determined for later comparison with other stability parameters, such as the FAVt and the one obtained through the P- Δ process, where both processes consider the effects of vertical loads in their determinations. As the effects of the execution of the pavements can be circumvented by increasing the axial stiffness of the columns, it was also evaluated how much this artifice can affect the determination of second order effects from the simplified processes. After the analysis, it was noticed that the increase in the axial stiffness of the columns did not produce significant changes among the stability parameters. Small variations were observed when comparing the stability parameters for the analyzed scenarios. The largest difference between the parameters came when the building showed asymmetry in only one direction.*

Keywords: *Gamma-z coefficient; global stability; second order effects.*

1 Introdução

Para a realização da análise estrutural, é fundamental a consideração dos efeitos de segunda ordem. Esses efeitos surgem a partir dos deslocamentos sofridos pela estrutura após a aplicação dos carregamentos, alterando a sua configuração original, resultando no surgimento de esforços extras que podem comprometer a estabilidade da edificação se não forem contabilizados, principalmente no caso de edifícios altos.

Apesar da sua importância, os efeitos de segunda ordem podem ser desprezados quando não representam mais que 10,0% dos efeitos de primeira ordem, estes obtidos a partir da análise estrutural sem a consideração dos deslocamentos. Quando esse percentual é ultrapassado, tais efeitos passam obrigatoriamente a ser considerados.

Para a determinação dos efeitos de segunda ordem, é possível utilizar processos considerados rigorosos, como o processo P-Delta (P- Δ), ou utilizar processos tidos como simplificados. Entre os processos simplificados, é possível citar o coeficiente Γ_{m2} , que é previsto na NBR 6118 (ABNT, 2014), e com ele é possível realizar duas operações. A primeira é poder saber se será necessário ou não considerar os efeitos de segunda ordem. A segunda é poder estimar esses efeitos de maneira aproximada.

A determinação do coeficiente *GamaZ* leva em consideração os efeitos provocados pelos deslocamentos sofridos pela estrutura a partir da aplicação das cargas horizontais, conforme a combinação de cargas considerada na análise. Ao multiplicar os deslocamentos de todos os andares de um edifício pelas respectivas cargas de seus pavimentos, é possível ter uma estimativa da magnitude do esforço de segunda ordem inicial, como aponta Kimura (2018).

Com essa metodologia de cálculo, é possível abraçar uma diversidade enorme de estruturas, principalmente aquelas que apresentam simetria em planta, por não apresentarem deslocamentos consideráveis devido à aplicação de cargas verticais.

Já no caso de estruturas que apresentam assimetria em planta, os deslocamentos provocados pelas cargas verticais passam a ser significativos, e quando somados aos provocados pelas cargas horizontais, passam a exercer um grande protagonismo no surgimento dos efeitos de segunda ordem. Por não considerar os deslocamentos provocados pelas cargas verticais, a estimativa dos efeitos de segunda ordem a partir do coeficiente *GamaZ* passa a ficar comprometida.

Considerando esse contexto, torna-se necessário criar estratégias para poder realizar a determinação dos efeitos de segunda ordem de forma simplificada, contemplando os provocados pelas cargas verticais. A partir disso foi implementado, no *software* CAD-TQS, o coeficiente *FAVt* (Fator de amplificação dos esforços horizontais ou de vento), que é calculado utilizando a mesma metodologia do *GamaZ*, com a diferença de considerar também os deslocamentos provocados pelas cargas verticais.

Mesmo com a consideração das cargas verticais, na determinação dos deslocamentos, em alguns casos, o coeficiente *FAVt* também passa a não ser tão eficiente, pois existem situações em que a aplicação das cargas verticais não conduz à situação mais desfavorável, sendo sugerido adotar o valor do *GamaZ*. Quando necessário, processos mais rigorosos podem ser empregados para que os efeitos de segunda ordem sejam adequadamente determinados.

Os deslocamentos da estrutura também são significativamente influenciados pela sequência de execução do edifício. Ao realizar a análise da estrutura considerando somente a estrutura completa, sem considerar a sequência de montagem dos pavimentos, é possível que a estimativa de distribuição de esforços também seja comprometida pela consideração da deformação longitudinal dos pilares e pela não consideração do nivelamento das vigas executadas a cada pavimento; isso acaba alterando o deslocamento relativo dos nós. Uma alternativa para mitigar esses efeitos é aumentar a área da seção transversal dos pilares de modo a diminuir os efeitos da deformação longitudinal desses elementos.

Tendo em vista a influência dos efeitos provocados pelo aumento da seção dos pilares, também se torna importante determinar se esse artifício exerce influência na determinação dos efeitos de segunda ordem de maneira simplificada.

Bueno (2009) considera que, nos casos reais, as edificações nem sempre são simétricas, sendo essa, entre outras, uma característica bastante comum dos projetos que pode mascarar a avaliação da estabilidade ao produzir resultados equivocados por meio desses parâmetros. Nesse sentido, Wordell (2003), em seu trabalho, considerou que, em alguns casos, a determinação do coeficiente *GamaZ* nem sempre apresenta resultados satisfatórios devido às configurações de alguns pavimentos, o que também pode ser confirmado a partir dos resultados de Cavalheiro (2016).

Ao estudar a consideração do aumento da seção transversal dos pilares para corrigir os efeitos da execução do edifício, Wordell (2003) segue afirmando que é preciso apreciar

esse fato na determinação dos parâmetros de estabilidade, mesmo que, em alguns casos, as alterações não sejam relevantes.

A partir da constatação da influência desses fatores na determinação dos efeitos de segunda ordem, mediante o uso de processos simplificados, torna-se interessante avaliar o quão desfavorável à estabilidade e à segurança da edificação, quando não se consideram os efeitos do carregamento vertical e da sequência de execução dos pavimentos a partir do aumento da seção dos pilares para contornar a problemática das deformações longitudinais, frente a processos mais rigorosos, como o P- Δ .

É importante para o projetista saber até que ponto é possível utilizar os processos tidos como simplificados de forma segura, sem comprometer a estabilidade da edificação, respeitando os Estados Limites.

Tendo em vista todas essas ponderações, este trabalho tem como objetivo avaliar a variação existente na consideração das cargas verticais na determinação dos efeitos de segunda ordem mediante o uso do processo simplificado *GamaZ*, comparando os valores obtidos por meio deste com os obtidos por intermédio do coeficiente *FAVt* e pelo processo P- Δ , apontando em quais casos a utilização de tais processos está ou não a favor da segurança para casos de edifícios com alturas variáveis, apresentando ou não simetria em planta. Além disso, o objetivo também está relacionado a determinar se existe influência considerável do efeito incremental, durante a execução dos pavimentos, a partir da consideração do aumento da seção transversal dos pilares na obtenção dos parâmetros de estabilidade.

2 Estabilidade global e efeitos de segunda ordem

Para a determinação dos efeitos de segunda ordem, é preciso considerar a influência da não linearidade física e geométrica, tendo em vista que o concreto é um material que não apresenta comportamento linear. Essa propriedade tem influência decisiva nessa determinação.

2.1 A importância da consideração da não linearidade física e geométrica

Para a avaliação da estabilidade global de uma edificação, é preciso conhecer a magnitude dos efeitos de segunda ordem, pois, como dito anteriormente, eles podem ser extremamente significativos ou até mesmo desprezados. A determinação desses efeitos envolve uma série de considerações, entre elas as não linearidades físicas e geométricas.

A consideração da não linearidade física é importante devido ao fato de o concreto não apresentar comportamento elástico-linear, o que resulta em um comportamento baseado na falta de proporcionalidade entre as tensões e as deformações.

Além disso, quando submetida à aplicação do carregamento, a inércia de uma peça de concreto armado pode variar consideravelmente a partir da fissuração sofrida por este, tendo em vista a sua baixa resistência à tração.

Considerando a magnitude do carregamento, a peça pode apresentar uma seção isenta de fissuração em que a resistência à tração do concreto ainda não foi superada, até o ponto onde a parte tracionada da seção se encontra totalmente fissurada, no qual

somente as barras de aço trabalham, resistindo aos esforços de tração e entrando em processo de escoamento. Isso altera a rigidez do elemento.

Além da fissuração, a fluência do concreto é um fenômeno que não deve ser desprezado, pois é possível existir deformações sem que haja aumento na tensão, e isso sem dúvidas altera a curvatura das seções dos elementos quando carregados.

Estudos apontam ser possível considerar os efeitos da não linearidade física de maneira aproximada, reduzindo a inércia dos elementos estruturais. Tendo isso em vista, para estruturas reticuladas com no mínimo quatro andares, a NBR 6118 (ABNT, 2014) fornece os seguintes valores:

- Lajes: $(E \cdot I)_{sec} = 0,3 E_{ci} \times I_c$
- Vigas: $(E \cdot I)_{sec} = 0,4 E_{ci} \times I_c$, para $A' s \neq A s$
 $(E \cdot I)_{sec} = 0,5 E_{ci} \times I_c$, para $A' s = A s$
- Pilares: $(E \cdot I)_{sec} = 0,8 E_{ci} \times I_c$

onde $(E \cdot I)_{sec}$ representa a rigidez reduzida dos elementos, I_c se refere ao momento de inércia da seção bruta da peça de concreto armado, E_{ci} se refere ao módulo de elasticidade tangente inicial do concreto e $A' s$ e $A s$ se referem, respectivamente, às áreas de aço superior e inferior da seção dos elementos.

Na falta de ensaios para a determinação do módulo de elasticidade, a NBR 6118 (ABNT, 2014) aponta que, para concretos com resistência característica f_{ck} até 50 MPa e produzidos com agregado graúdo do tipo granítico, ele pode ser obtido da seguinte forma (Equação 1):

$$E_{ci} = 5600 \times \sqrt{f_{ck}} \quad (1)$$

Após a aplicação do carregamento, a estrutura passa a apresentar mudanças na sua geometria, resultando em afastamentos relativos dos pontos de aplicação de carga. Esses deslocamentos sofridos pela estrutura resultam no surgimento de esforços que não são proporcionais ao carregamento aplicado. Nesse ponto, apresenta-se a não linearidade geométrica.

Com a mudança nos pontos de aplicação dos carregamentos, isso acaba resultando no surgimento de novos esforços e conseqüentemente novos deslocamentos. Isso vai acontecendo até a estrutura atingir o equilíbrio.

Para exemplificar a não linearidade geométrica em seu trabalho, Kimura (2018) utilizou uma barra com seção de 30,0 cm de base e 30,0 cm de altura, com módulo de elasticidade igual a 28 GPa, engastada na base e livre no topo, submetida à aplicação de uma carga horizontal, no seu topo, de 100 kN. Para avaliar o efeito da não linearidade geométrica, foi considerada uma aplicação crescente de cargas verticais, partindo de 0 kN até 1000 kN, com variações de 200 kN. Nas Figuras 1 e 2 são apresentados os resultados para o momento fletor final e o deslocamento final, respectivamente.

Pelo indicado nas Figuras 1 e 2, é possível notar a não linearidade entre a carga aplicada e os efeitos, por isso a necessidade da consideração da não linearidade geométrica na análise estrutural.

Figura 1 ▶

Relação entre o momento fletor e o carregamento vertical.
 Fonte: adaptado de Kimura (2018)

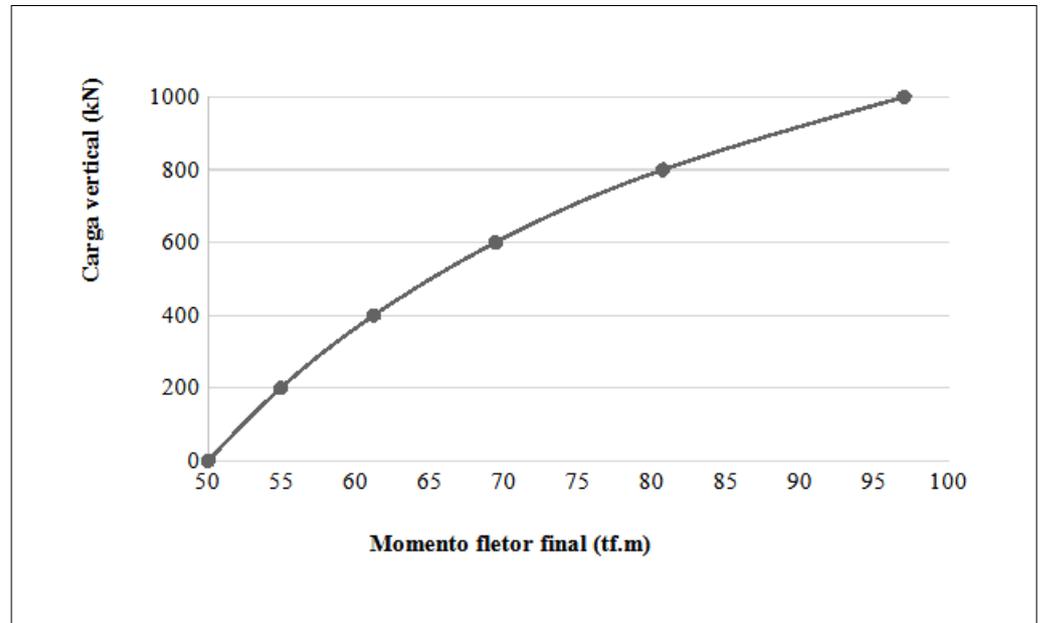
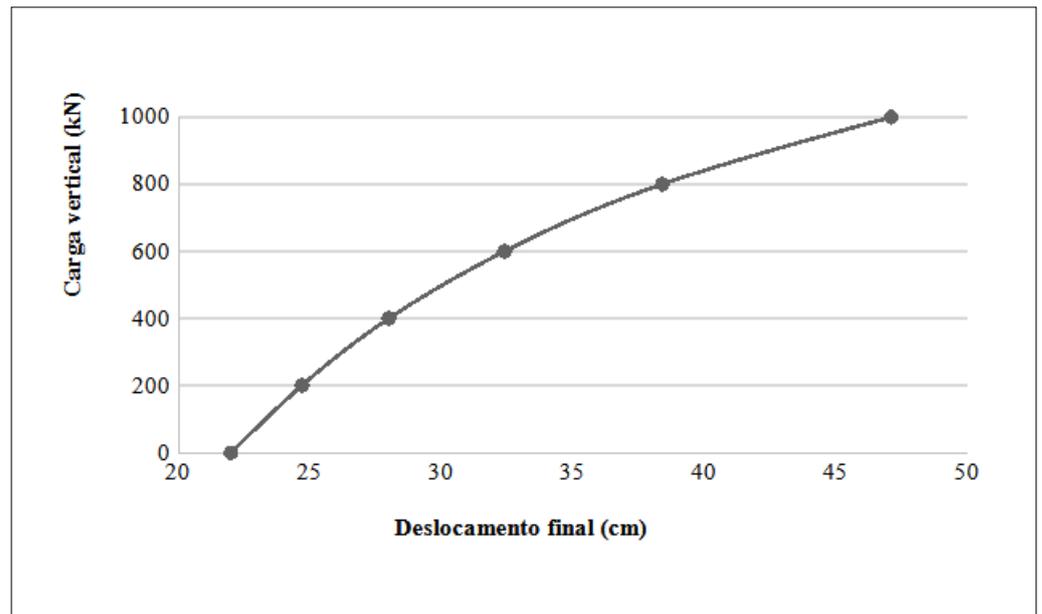


Figura 2 ▶

Relação entre o deslocamento horizontal e o carregamento vertical.
 Fonte: adaptado de Kimura (2018)



2.2 Parâmetros para a determinação dos efeitos de segunda ordem

Entre os parâmetros para a determinação dos efeitos de segunda ordem, é possível citar o coeficiente $GamaZ$ (Y_2). Como dito, esse coeficiente é utilizado tanto para classificar a estrutura com relação a sua deslocabilidade, nós fixos ou móveis, como para quantificar, de forma aproximada, os efeitos de segunda ordem, caso seja necessário considerá-los.

Conforme proposto pela NBR 6118 (ABNT, 2014), o coeficiente $GamaZ$ é obtido pela Equação 2:

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

onde:

- $\Delta M_{tot,d}$ é a soma dos produtos de todas as forças verticais atuantes na estrutura, na combinação considerada, com seus valores de cálculo, pelos deslocamentos horizontais de seus respectivos pontos de aplicação, obtidos na análise de primeira ordem;
- $M_{1,tot,d}$ é o momento de tombamento na direção analisada, ou seja, a soma dos momentos de todas as forças horizontais, em uma dada direção, na combinação considerada, com seus valores de cálculo, em relação à base da estrutura.

O coeficiente $GamaZ$ considera somente os deslocamentos sofridos pela estrutura em uma dada direção a partir da aplicação das forças horizontais nessa direção, sendo necessário reduzir a rigidez dos elementos para simular a não linearidade física de maneira aproximada. Nessa conta, não entram os deslocamentos horizontais produzidos a partir da aplicação das cargas verticais. Para cada direção de aplicação das cargas horizontais e para cada combinação de cargas é calculado um coeficiente $GamaZ$.

Como, em alguns casos, os deslocamentos produzidos pelas cargas verticais podem se tornar significativos, contribuindo para o aumento dos efeitos de segunda ordem, foi desenvolvido o coeficiente $FAVt$, que leva em consideração os deslocamentos horizontais produzidos pelas forças horizontais e verticais e segue a mesma metodologia de cálculo do $GamaZ$, em que a parcela $\Delta M_{tot,d}$ tem também a contribuição dos deslocamentos produzidos pelas cargas verticais.

Quando os resultados obtidos por meio da consideração da aplicação das cargas verticais e horizontais se tornam menores do que os obtidos, somente com a aplicação das cargas horizontais, torna-se a favor da segurança utilizar apenas o valor do $GamaZ$.

Os valores de $GamaZ$ e $FAVt$ giram em torno de 1,00 e 1,30. Em uma determinada situação, quando o valor obtido for menor ou igual a 1,10, não é preciso considerar os efeitos de segunda ordem, sendo a estrutura classificada como de nós fixos para aquela combinação de cargas e direção das cargas horizontais. Quando esse valor ultrapassa a fronteira de 1,10, torna-se obrigatório considerar os efeitos de segunda ordem. Vários coeficientes são calculados para as diferentes direções de vento e para as diversas combinações.

Para a obtenção dos esforços finais, que são os esforços de primeira mais os de segunda ordem, ampliam-se as cargas horizontais multiplicando-as pelo maior dos seguintes valores: $0,95 \cdot \gamma_z$ ou $0,95 \cdot FAVt$.

Uma maneira de determinar os efeitos de segunda ordem, de maneira mais refinada, é por meio da análise que utiliza o processo P-Delta. Esse é um método iterativo em que sucessivos acréscimos de esforços são feitos na estrutura conforme a deslocabilidade que esta venha a apresentar.

A primeira interação acontece por ocasião da análise de primeira ordem. Após o deslocamento inicial, são computados os esforços produzidos a partir dele. Os esforços derivados desse deslocamento inicial são aplicados na estrutura, com posterior verificação dos novos deslocamentos sofridos por ela.

Esses novos deslocamentos produzirão novos esforços, menores do que os obtidos na primeira interação, novamente aplicados na estrutura, que se deslocará mais uma vez. Isso é feito de forma sucessiva até que a estrutura atinja o equilíbrio.

Ao final das interações, a estrutura apresentará a distribuição de esforços finais, contemplando também os esforços de segunda ordem. Posteriormente, esforços adicionais baseados na distribuição de esforços finais são convertidos em cargas horizontais equivalentes.

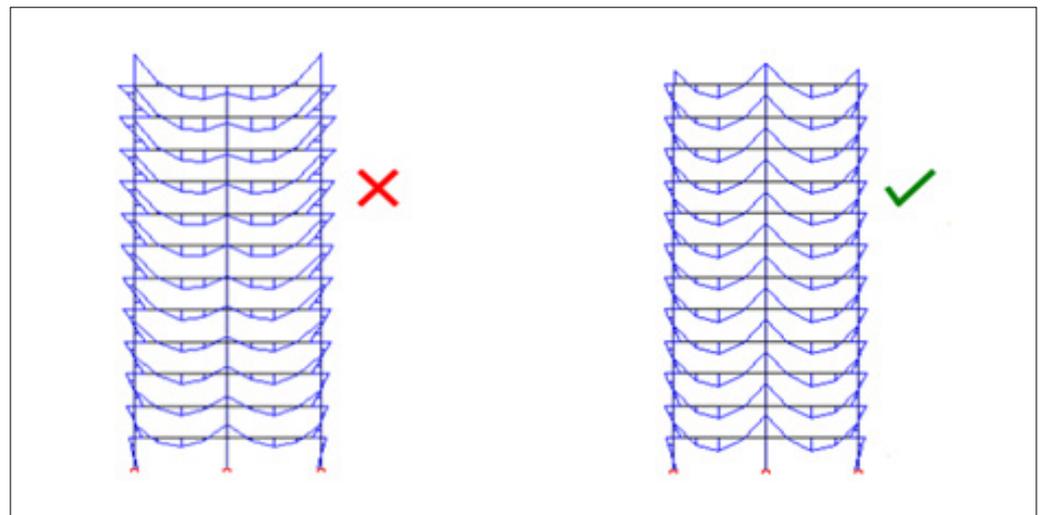
No sistema CAD-TQS, essa majoração dos esforços horizontais ocorre por intermédio do coeficiente RM2M1, que também apresenta valores maiores do que 1,0 (CAVALHEIRO, 2016).

2.3 Consideração dos efeitos construtivos na análise estrutural

Quando a estrutura é analisada utilizando-se como modelo estrutural pórticos planos ou pórticos espaciais, a análise é feita considerando a estrutura inteiramente executada. No entanto, na realidade, a estrutura é executada pavimento por pavimento, e somente após ser totalmente executada, ela receberá os demais carregamentos, como pisos, alvenarias etc.

Quando a estrutura é analisada inteiramente, é possível que as deformações longitudinais dos pilares possam conduzir a resultados inconsistentes, proporcionando, principalmente, a diminuição dos esforços negativos nos apoios, como é ilustrado na Figura 3.

Figura 3 ►
Comparativo da distribuição dos esforços nos edifícios sem o aumento e com o aumento na rigidez dos elementos.
Fonte: TQS Docs (2018)



Considerando que, durante a execução dos pavimentos, os pilares são aprumados e as vigas são sempre niveladas, o efeito da deformação dos elementos é atenuado conforme essas etapas vão sendo concluídas.

De acordo com Kimura (2018), tem-se adotado multiplicadores que majoram a rigidez axial dos pilares de três a cinco vezes. Com isso, é possível obter resultados mais condizentes com a realidade sem grandes alterações na metodologia de cálculo.

3 Método da pesquisa

O presente estudo utilizou três modelos de pavimentos para a realização das análises. A mesma planta de forma foi utilizada para as análises dos edifícios com cinco e dez pavimentos.

Figura 4 ▼
Planta de forma do Edifício 1.
Fonte: elaborada pelo autor

O Edifício 1 (Figura 4) apresenta simetria em planta nas direções vertical e horizontal, sendo composto por 22 pilares com seção de 20 × 40 cm e vigas com seção de 15 × 40 cm, exceto as vigas 11 e 14, que possuem seção de 15 × 50 cm.

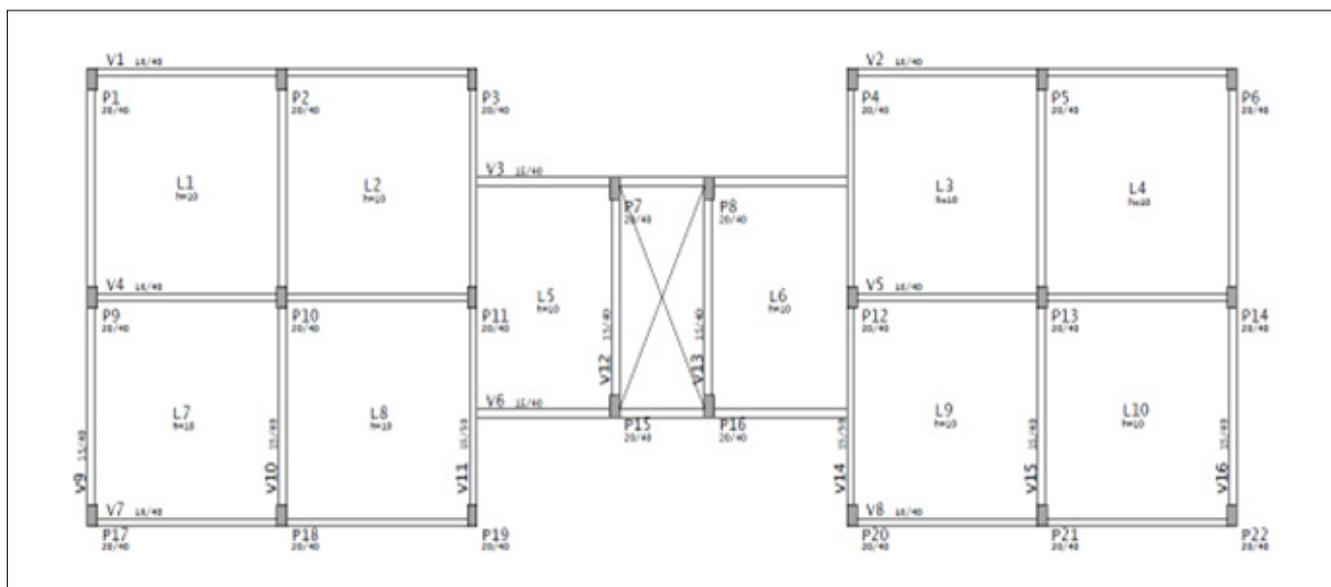


Figura 5 ▼
Planta de forma do Edifício 2.
Fonte: elaborada pelo autor

O Edifício 2 (Figura 5) apresenta simetria em planta apenas na direção vertical. Na direção horizontal, o pavimento é assimétrico, sendo também composto por 22 pilares com seção de 20 × 40 cm e vigas com seção de 15 × 40 cm, exceto as vigas 11 e 14, que possuem seção de 20 × 50 cm.

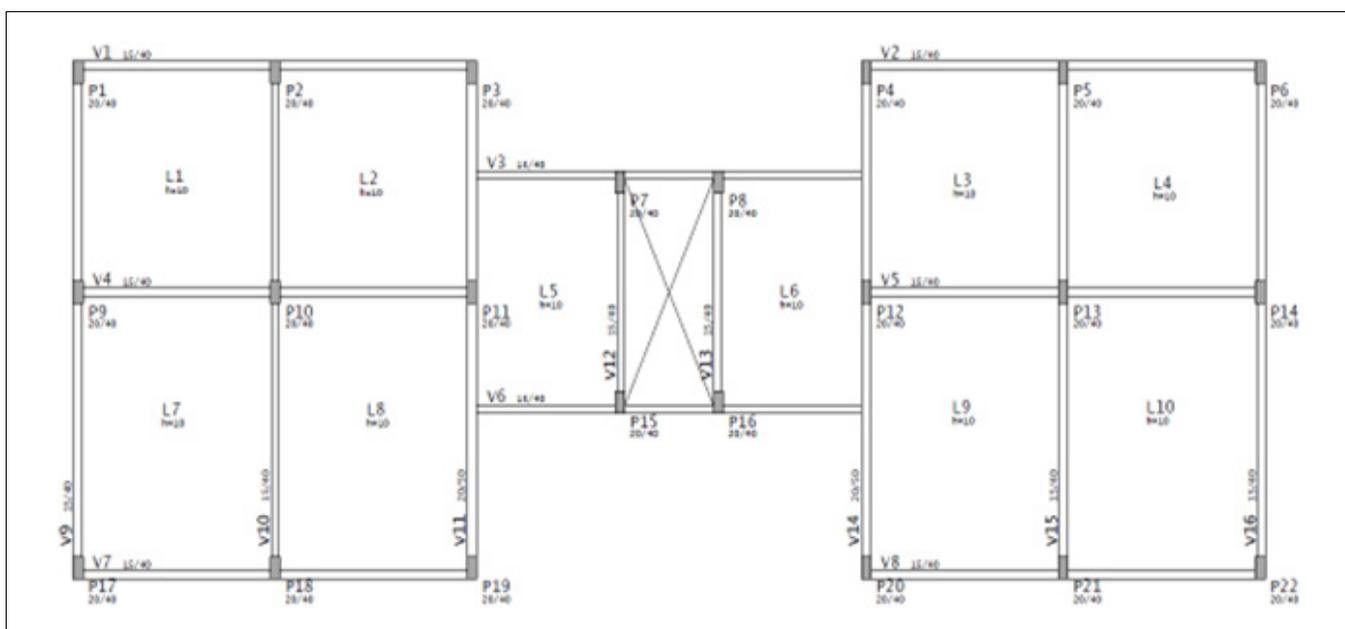
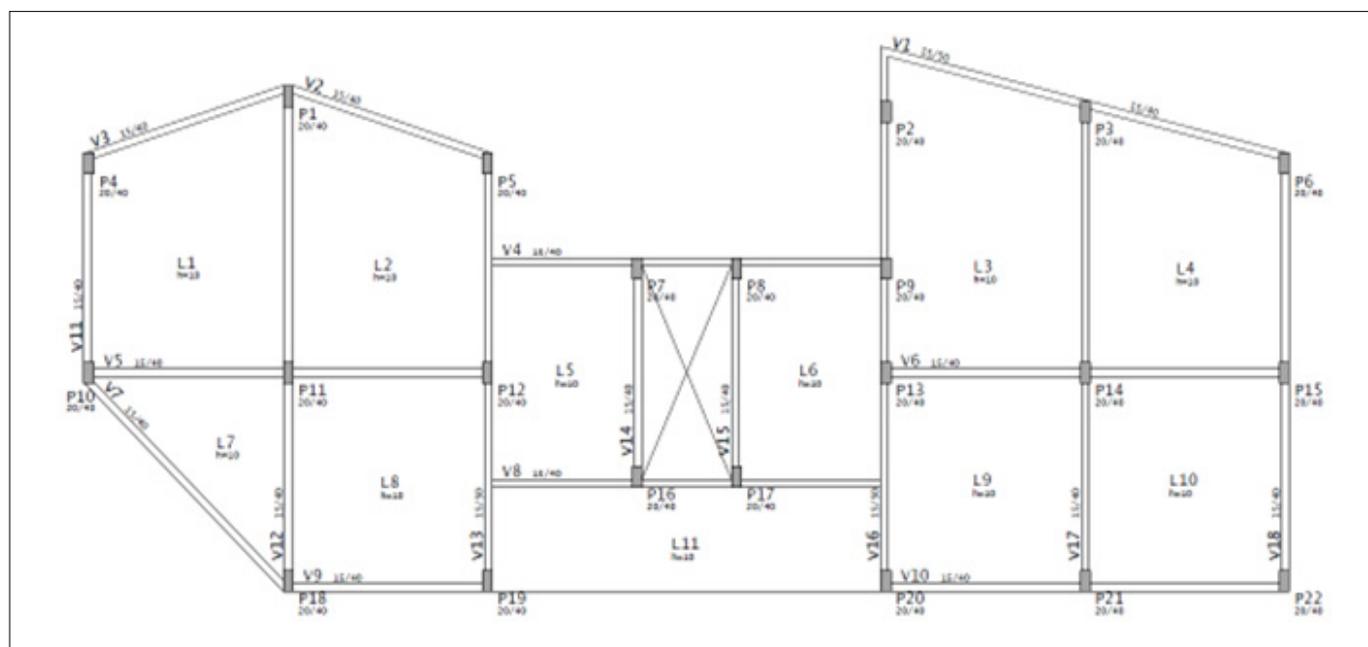


Figura 6 ▼
Planta de forma do Edifício 3.
Fonte: elaborada pelo autor

O Edifício 3 (Figura 6) não apresenta simetria em planta em nenhuma direção, sendo também composto por 22 pilares com seção de 20×40 cm e vigas com seção de 15×40 cm, exceto as vigas 1, 13 e 16, que apresentam seção com 20×50 cm.



Cada edifício foi composto por pavimentos tipo (Figuras 4, 5 e 6) e uma cobertura, com altura de 3,0 m entre os pavimentos.

O software utilizado neste estudo foi o TQS, fornecido pela TQS Informática, versão V21 Unipro12.

Para cada edifício, foram determinados o coeficiente $GamaZ$ e o coeficiente $FAVt$, considerando-se o aumento da rigidez dos pilares com o aumento fictício da seção em três vezes. Posteriormente os efeitos de segunda ordem foram determinados por intermédio do processo P- Δ , observando-se o aumento da rigidez dos pilares com o aumento fictício da seção também em três vezes. Por fim, foram determinados os coeficientes $GamaZ$ e $FAVt$ sem o aumento da rigidez axial dos pilares.

No total, foram realizadas 18 simulações com combinações de carga, observando-se ora a carga acidental como principal, ora a carga do vento como principal.

Para a consideração da não linearidade física da estrutura, a rigidez dos elementos foi reduzida utilizando-se os coeficientes redutores fornecidos pela NBR 6118 (ABNT, 2014), bem como a contribuição da laje para o aumento da rigidez da viga. A rigidez à torção das vigas sem predominância do efeito da torção foi desprezada.

Em termos de características mecânicas, a resistência característica do concreto adotado neste trabalho foi de 30 MPa, e o módulo de elasticidade foi obtido de forma aproximada conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014).

Para a determinação da carga de vento, foi utilizada uma velocidade básica de 45 m/s para as direções de 0° , 90° , 180° e 270° . Para a determinação da velocidade característica, o terreno foi considerado plano, categoria II e classe B.

O edifício é de uso tipicamente residencial, com carga acidental de $1,5 \text{ kN/m}^2$ e carga permanente de $1,0 \text{ kN/m}^2$. Todas as vigas receberam uma carga de alvenaria da ordem de $5,0 \text{ kN/m}$.

4 Resultados da pesquisa

Nesta seção são apresentados os resultados das análises realizadas para cada edifício.

4.1 Edifício 1

As Tabelas 1 e 2 apresentam os resultados obtidos para as análises, ora considerando, ora não o aumento da rigidez dos pilares, respectivamente, para o Edifício 1 com cinco pavimentos.

Tabela 1 ►

Parâmetros de estabilidade do Edifício 1 com cinco pavimentos considerando o aumento da rigidez axial dos pilares.
Fonte: dados da pesquisa

Direção	Carga acidental como a principal			Carga do vento como a principal		
	γ_z	$FAVt$	RM2M1	γ_z	$FAVt$	RM2M1
90°	1,042	1,042	1,042	1,042	1,042	1,042
270°	1,042	1,042	1,042	1,042	1,042	1,042
0°	1,151	1,155	1,158	1,151	1,154	1,156
180°	1,151	1,151	1,150	1,151	1,151	1,151

Tabela 2 ►

Parâmetros de estabilidade do Edifício 1 com cinco pavimentos sem a consideração do aumento da rigidez axial dos pilares.
Fonte: dados da pesquisa

Direção	Carga acidental como a principal		Carga do vento como a principal	
	γ_z	$FAVt$	γ_z	$FAVt$
90°	1,042	1,042	1,042	1,042
270°	1,042	1,042	1,042	1,042
0°	1,151	1,155	1,151	1,154
180°	1,151	1,151	1,151	1,151

As Tabelas 3 e 4 apresentam os resultados obtidos para o Edifício 1 com dez pavimentos.

Tabela 3 ►

Parâmetros de estabilidade do Edifício 1 com dez pavimentos considerando o aumento da rigidez axial dos pilares.
Fonte: dados da pesquisa

Direção	Carga acidental como a principal			Carga do vento como a principal		
	γ_z	$FAVt$	RM2M1	γ_z	$FAVt$	RM2M1
90°	1,097	1,097	1,098	1,097	1,097	1,098
270°	1,097	1,098	1,099	1,097	1,097	1,098
0°	1,393	1,399	1,422	1,393	1,396	1,415
180°	1,393	1,393	1,414	1,393	1,393	1,410

Tabela 4 ▶

Parâmetros de estabilidade do Edifício 1 com dez pavimentos sem a consideração do aumento da rigidez axial dos pilares.
Fonte: dados da pesquisa

Direção	Carga accidental como a principal		Carga do vento como a principal	
	γ_z	<i>FAVt</i>	γ_z	<i>FAVt</i>
90°	1,097	1,097	1,097	1,097
270°	1,097	1,097	1,097	1,097
0°	1,393	1,399	1,393	1,396
180°	1,393	1,393	1,393	1,393

4.2 Edifício 2

O Edifício 2 apresenta simetria em planta somente em relação ao eixo Y. As Tabelas 5 e 6 apresentam os resultados obtidos nas simulações, ora considerando, ora não o aumento da rigidez dos pilares, respectivamente, para o Edifício 2 com cinco pavimentos.

Tabela 5 ▶

Parâmetros de estabilidade do Edifício 2 com 5 pavimentos considerando o aumento da rigidez axial dos pilares.
Fonte: dados da pesquisa

Direção	Carga accidental como a principal			Carga do vento como a principal		
	γ_z	<i>FAVt</i>	RM2M1	γ_z	<i>FAVt</i>	RM2M1
90°	1,045	1,047	1,047	1,045	1,046	1,047
270°	1,045	1,045	1,044	1,045	1,045	1,044
0°	1,164	1,165	1,169	1,164	1,165	1,168
180°	1,164	1,164	1,168	1,164	1,164	1,167

Tabela 6 ▶

Parâmetros de estabilidade do Edifício 2 com cinco pavimentos sem a consideração do aumento da rigidez axial dos pilares.
Fonte: dados da pesquisa

Direção	Carga accidental como a principal		Carga do vento como a principal	
	γ_z	<i>FAVt</i>	γ_z	<i>FAVt</i>
90°	1,045	1,046	1,045	1,046
270°	1,045	1,045	1,045	1,045
0°	1,164	1,165	1,164	1,165
180°	1,164	1,164	1,164	1,164

As Tabelas 7 e 8 apresentam os resultados obtidos para o Edifício 2 com dez pavimentos.

Tabela 7 ▶

Parâmetros de estabilidade do Edifício 2 com dez pavimentos considerando o aumento da rigidez axial dos pilares.

Fonte: dados da pesquisa

Direção	Carga acidental como a principal			Carga do vento como a principal		
	γ_z	<i>FAVt</i>	RM2M1	γ_z	<i>FAVt</i>	RM2M1
90°	1,106	1,107	1,109	1,106	1,107	1,108
270°	1,106	1,106	1,106	1,106	1,105	1,106
0°	1,437	1,438	1,469	1,437	1,437	1,461
180°	1,437	1,436	1,467	1,437	1,436	1,461

Tabela 8 ▶

Parâmetros de estabilidade do Edifício 2 com dez pavimentos sem a consideração do aumento da rigidez axial dos pilares.

Fonte: dados da pesquisa

Direção	Carga acidental como a principal		Carga do vento como a principal	
	γ_z	<i>FAVt</i>	γ_z	<i>FAVt</i>
90°	1,106	1,106	1,106	1,105
270°	1,106	1,107	1,106	1,107
0°	1,437	1,438	1,437	1,437
180°	1,437	1,436	1,437	1,436

4.3 Edifício 3

O Edifício 3 apresenta assimetria em planta. As Tabelas 9 e 10 indicam os resultados dos parâmetros de estabilidade para o Edifício 3 com cinco pavimentos.

Tabela 9 ▶

Parâmetros de estabilidade do Edifício 3 com cinco pavimentos considerando o aumento da rigidez axial dos pilares.

Fonte: dados da pesquisa

Direção	Carga acidental como a principal			Carga do vento como a principal		
	γ_z	<i>FAVt</i>	RM2M1	γ_z	<i>FAVt</i>	RM2M1
90°	1,045	1,045	1,044	1,045	1,044	1,044
270°	1,045	1,046	1,046	1,045	1,045	1,045
0°	1,165	1,165	1,165	1,165	1,165	1,166
180°	1,165	1,170	1,173	1,165	1,168	1,171

Tabela 10 ▶

Parâmetros de estabilidade do Edifício 3 com cinco pavimentos sem a consideração do aumento da rigidez axial dos pilares.
Fonte: dados da pesquisa

Direção	Carga acidental como a principal		Carga do vento como a principal	
	γ_z	<i>FAVt</i>	γ_z	<i>FAVt</i>
90°	1,045	1,045	1,045	1,044
270°	1,045	1,046	1,045	1,046
0°	1,165	1,165	1,165	1,165
180°	1,165	1,172	1,165	1,169

As Tabelas 11 e 12 apresentam os resultados obtidos para o Edifício 3 com dez pavimentos.

Tabela 11 ▶

Parâmetros de estabilidade do Edifício 3 com dez pavimentos considerando o aumento da rigidez axial dos pilares.
Fonte: dados da pesquisa

Direção	Carga acidental como a principal			Carga do vento como a principal		
	γ_z	<i>FAVt</i>	RM2M1	γ_z	<i>FAVt</i>	RM2M1
90°	1,105	1,104	1,105	1,105	1,104	1,105
270°	1,105	1,106	1,107	1,105	1,105	1,106
0°	1,438	1,438	1,438	1,438	1,438	1,438
180°	1,438	1,444	1,449	1,438	1,442	1,444

Tabela 12 ▶

Parâmetros de estabilidade do Edifício 3 com dez pavimentos sem a consideração do aumento da rigidez axial dos pilares.
Fonte: dados da pesquisa

Direção	Carga acidental como a principal		Carga do vento como a principal	
	γ_z	<i>FAVt</i>	γ_z	<i>FAVt</i>
90°	1,105	1,105	1,105	1,105
270°	1,105	1,107	1,105	1,106
0°	1,438	1,438	1,438	1,438
180°	1,438	1,449	1,438	1,444

4.4 Discussão dos resultados

Observando os resultados obtidos a partir da análise do Edifício 1, é possível afirmar que a não consideração do aumento da rigidez axial dos pilares não provocou alterações nos resultados dos parâmetros de estabilidade, tanto para o edifício com cinco pavimentos como para o edifício com dez. Nesse sentido, é possível dizer que o mesmo aconteceu com os resultados da análise do Edifício 2, uma vez que não foi possível observar alterações significativas. Já para os resultados da análise do Edifício 3, na direção de 180°, foi sentida uma leve variação do coeficiente *FAVt* de 0,35%, no caso desse edifício com dez pavimentos, considerando a carga acidental como a principal. Uma variação ainda menor nessa mesma direção, também considerando a carga acidental como a principal na combinação, foi observada para esse edifício com cinco pavimentos, atingindo uma variação de apenas 0,17%.

resultavam em uma diferença significativa das armaduras. Por fim, é preciso destacar que as diferenças observadas foram justamente nos pilares que suportavam mais esforço normal.

Comparando os parâmetros de estabilidade, todos aqueles que consideravam a carga de vento como a principal tiveram uma leve redução. Isso já era previsível, pois os parâmetros de estabilidade são amplamente influenciados pelos carregamentos verticais.

Em relação ao *GamaZ*, o Edifício 1 apresentou um pequeno aumento de 0,34% no valor de *FAVt* e 0,60% no valor de *RM2M1*, na direção de 0°. O Edifício 2 também apresentou um pequeno aumento de 0,08% no valor de *FAVt* e 0,43% no valor de *RM2M1*, na direção de 0°. Já o Edifício 3, por sua vez, apresentou um aumento de 0,42% no valor de *FAVt* e 0,68% no valor de *RM2M1*, na direção de 180°. Tudo isso para os edifícios com cinco pavimentos, considerando a carga acidental como a principal.

Para os edifícios com dez pavimentos, no caso do Edifício 1, foi observado um aumento de 0,43% no valor de *FAVt* e 2,08% no valor de *RM2M1*, na direção de 0° em relação ao *GamaZ*. O Edifício 2 apresentou aumentos tanto na direção de 0° como na direção de 180°, sendo maior na primeira direção, na qual a variação foi de 0,06% no valor de *FAVt* e 2,22% no valor de *RM2M1*. Por fim, o Edifício 3 apresentou um aumento bem menor que o apresentado nos outros exemplos, em que foi observado um aumento de apenas 0,41% no valor de *FAVt* e 0,76% no valor de *RM2M1*, na direção de 180° em relação ao *GamaZ*. Isso foi realizado considerando a carga acidental como a carga principal.

Ao observar os valores obtidos nos diversos cenários estudados, é perceptível que a variação existente entre os parâmetros é bem baixa. Essas variações não chegaram nem a 1,0% para os casos dos edifícios com cinco pavimentos. Para os casos dos edifícios com dez pavimentos, a máxima variação foi menor que 2,5%. Vale destacar que os edifícios com dez pavimentos apresentaram valores dos parâmetros de estabilidade maiores que 1,3 nas direções de 0° e 180°, sendo justamente nestas onde as diferenças foram maiores.

Outro ponto que chamou atenção foi a variação dos valores dos parâmetros do Edifício 3, sendo menores que os dos demais edifícios.

Aumentando-se a rigidez dos edifícios com dez pavimentos, de modo que os parâmetros de estabilidade reduzissem para valores menores que 1,3, nas direções de 0° e 180°, o que se percebeu foi uma diminuição na variação dos parâmetros de estabilidade, como pode ser observado na Tabela 13. Na ocasião, apenas a carga acidental foi utilizada como a principal.

Tabela 13 ►

Parâmetros de estabilidade para os edifícios com dez pavimentos após o aumento da rigidez.

Fonte: dados da pesquisa

Edifício	Parâmetros	Direção			
		90°	270°	0°	180°
1	γ_z	1,132	1,132	1,202	1,202
	<i>FAVt</i>	1,132	1,132	1,203	1,202
	<i>RM2M1</i>	1,134	1,134	1,208	1,206
2	γ_z	1,142	1,142	1,221	1,221
	<i>FAVt</i>	1,148	1,142	1,220	1,221
	<i>RM2M1</i>	1,150	1,139	1,227	1,227
3	γ_z	1,140	1,140	1,220	1,220
	<i>FAVt</i>	1,140	1,142	1,220	1,222
	<i>RM2M1</i>	1,140	1,145	1,220	1,221

A maior variação encontrada foi de 0,70% entre os valores de RM2N1 e *GamaZ*, no caso do Edifício 2 na direção de 90°. Isso mostra que os parâmetros de estabilidade podem ser utilizados com segurança desde que não se ultrapassem os valores limites especificados.

5 Considerações finais

Para os exemplos aqui analisados, foi possível perceber que as variações entre os parâmetros de estabilidade foram bem baixas. Elas aconteceram em apenas algumas direções, sendo que as menores aconteceram para o Edifício 3, com assimetria em planta em todas as direções.

Outro ponto importante observado foi o aumento dos valores de RM2M1 quando os valores de *GamaZ* fugiam dos limites especificados, que é de 1,3. Isso indica que a melhor saída, nesse caso, é realmente utilizar processos mais rigorosos quando situações como essas surgirem, sendo necessário observar ainda os deslocamentos máximos da estrutura.

A partir das análises, foi possível observar que o aumento da rigidez axial dos pilares pouco influenciou na determinação dos parâmetros. Além disso, foi constatada a necessidade latente dessa consideração para a obtenção dos esforços internos, aproximando-se da realidade.

Para situações de maior complexidade, com a presença de vigas de transição, por exemplo, é importante fazer uma avaliação mais criteriosa, sendo necessário utilizar processos mais rigorosos. No geral, bons resultados são obtidos com o uso de processos simplificados, desde que os limites dos processos sejam respeitados.

Financiamento

Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

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

BUENO, M. M. E. **Avaliação dos parâmetros de instabilidade global em estruturas de concreto armado**. 2009. 88 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2009. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/4622>. Acesso em: 10 out. 2021.

CAVALHEIRO, R. **Análise da estabilidade global de edifício em concreto armado com os parâmetros γ_z e FAVt**. 2016. 99 f. Trabalho de Conclusão de Curso

(Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2016. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/14486>. Acesso em: 21 out. 2021.

KIMURA, A. E. **Informática aplicada a estruturas de concreto armado**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2018.

TQS-DOCS. **Estabilidade global e 2ª ordem**. 2018. Disponível em <http://docs.tqs.com.br/Docs/Details?id=3155&language=pt-BR>. Acesso em: 11 fev. 2021.

WORDELL, F. **Avaliação da instabilidade global de edifícios altos**. 2003. 94 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/10167>. Acesso em: 12 out. 2021.