

Análise da Estabilidade Global em Edifício de Concreto Armado com Lajes Lisas: Estudo de Caso

Analysis of Global Stability in Reinforced Concrete Building with Flat Slabs: Case Study

*Bruna Gôbbo de Águas(1); Marcelo Victor Mesquita Pires(2); Wellington Andrade da Silva(3);
José Júlio de Cerqueira Pituba(4)*

1 Universidade Federal de Goiás, Catalão, GO, Brasil.

E-mail: brunagobbo.bga@gmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2586-0168>

2 Universidade Federal de Goiás, Catalão, GO, Brasil.

E-mail: marcelovictor@outlook.com | ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8590-7581>

3 Universidade Federal de Goiás, Catalão, GO, Brasil.

E-mail: wellington_andrade@ufg.br | ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0964-880X>

4 Universidade Federal de Goiás, Catalão, GO, Brasil.

E-mail: julio_pituba@ufg.br | ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1480-6238>

Revista de Engenharia Civil IMED, Passo Fundo, vol. 8, n. 2, p. 69-87, julho-dezembro, 2021 - ISSN 2358-6508

[Recebido: novembro 05, 2020; Aceito: março 31, 2021]

DOI: <https://doi.org/10.18256/2358-6508.2021.v8i2.4363>

Sistema de Avaliação: *Double Blind Review*

Editora: Aline Zanchet

Como citar este artigo / How to cite item: [clique aqui/click here!](#)

Resumo

O conhecimento voltado para a área da engenharia de estruturas se mostra crescente no que diz respeito às arquiteturas que lançam grandes desafios na hora de idealizar um projeto estrutural. Em virtude de tal situação, a análise da estabilidade de um sistema estrutural é realizada conhecendo as propriedades do material e dos elementos que compõem o arranjo estrutural como um todo. Neste trabalho, o material utilizado será o concreto armado e o sistema estrutural formado por pilares e lajes lisas. Dessa forma, o intuito do trabalho é contribuir para o entendimento do comportamento estrutural dessa tipologia de sistema estrutural, pois as lajes lisas apresentam uma configuração diferente das lajes convencionais, isso porque não descarregam as ações que lhes é imposta nos elementos de vigas, mas sim diretamente nos pilares, o que pode gerar maior instabilidade para o sistema estrutural. Nesse sentido, para um edifício de concreto armado, com 8 pavimentos, foram utilizados dois métodos de análise, sendo estes: modelo de pórtico espacial e processo P-Delta e o modelo de pórtico plano com o método dos pórticos planos associados. Assim, buscaram-se resultados referentes à análise da estabilidade global, tais como os momentos de primeira e segunda ordem, bem como os valores dos coeficientes γ_z , para a atuação do vento a 0° e 90° . Os resultados alcançados para o coeficiente γ_z foram muito similares para os dois métodos, por se tratar de um parâmetro qualitativo. Porém, ressalta-se que quanto as estimativas de esforços de primeira e segunda ordem, os resultados obtidos demonstram que o método do pórtico plano associado não é conservador, não sendo recomendado o seu uso para fins de projeto e dimensionamento do sistema estrutural estudado, sendo indicado somente para casos de pré-dimensionamento.

Palavras-chave: Concreto Armado. Lajes Lisas. Análise de Segunda Ordem. Processo P-Delta. Método do Pórtico Associado.

Abstract

The knowledge focused on the area of structural engineering is growing with regard to architectures that pose great challenges when it comes to idealizing a structural project. Thus, the stability analysis of a structural system is performed by knowing the material properties and the elements that make up the structural arrangement as a whole. In this work, the material used will be reinforced concrete and the structural system formed by columns and flat slabs. Thus, the purpose of the work is to contribute to the understanding of the structural behavior of this type of structural system, since the flat slabs present a different configuration from conventional slabs, this is because they do not discharge the actions imposed on the beam elements, but rather directly on the pillars, which can generate greater instability for the structural system. In this sense, for a reinforced concrete building, with 8 floors, two methods of analysis were used, namely: spatial frame model and P-Delta process and the flat frame model with the associated flat frame method. Thus, It was sought results regarding the analysis of global stability, such as the first and second order moments, as well as the values of the coefficients γ_z , for the wind performance at 0° and 90° . The results achieved for the γ_z , coefficient were very similar for both methods, as it is a qualitative parameter. However, it is noteworthy that regarding the first and second order forces estimates, the obtained results demonstrate that the associated flat frame method is not conservative, and its use for project and design purposes of the studied structural system is not recommended, being indicated only for pre-designing cases.

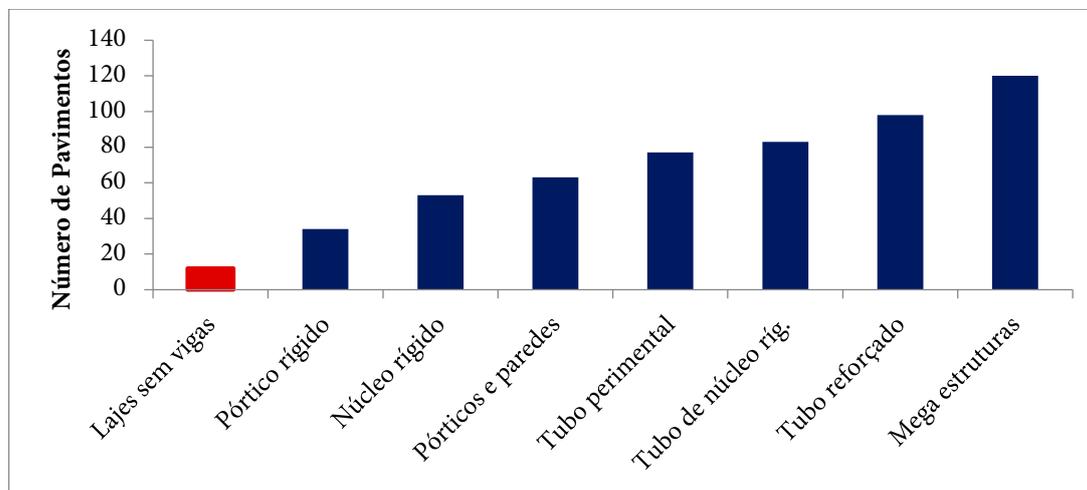
Keywords: Reinforced concrete. Flat Slabs. Second Order Analysis. P-Delta process. Associated Flat Frame Method.

1 Introdução

A análise estrutural em edificações que apresentam múltiplos pavimentos remete certas problemáticas no âmbito da engenharia civil, seja em termos de projetos, execução ou até mesmo nas condições de uso apresentadas ao longo do tempo. Nesse sentido, se faz possível relacionar a altura da edificação com os efeitos das ações a ela impostas, isto é, quanto mais altos forem tais edifícios, mais consideráveis serão as ações no sentido horizontal das mesmas, a exemplo têm-se as forças do vento, o que torna essas ações tão relevantes à análise estrutural quanto às ações provocadas pelas forças verticais de cada pavimento. Em consequência, verifica-se também que os efeitos da não linearidade geométrica são intensificados, o que traz deslocamentos maiores e interferem diretamente no equilíbrio mecânico do edifício, retratando assim, que as considerações da teoria linear, apenas por seus conceitos, não são capazes de respaldar a análise estrutural de um edifício com múltiplos pavimentos (SILVA, 2014).

Dessa forma, levando em consideração o melhoramento nas funções estruturais em diversos projetos, verifica-se modificação, tanto em relação aos sistemas estruturais convencionais (lajes, vigas, pilares e elementos de fundação) quanto na altura dos edifícios atualmente projetados e construídos (GUTIERRE, 2016). Na Figura 1 encontra-se uma relação entre alguns tipos de sistemas estruturais e as alturas com que os mesmos são comumente aplicáveis.

Figura 1. Tipologia estrutural de acordo com a altura



Fonte: Adaptado de Silva, 2014.

Voltando-se para os conceitos acerca das lajes lisas em estruturas de concreto armado, as quais se enquadram na tipologia de lajes sem vigas, verifica-se que tal modelo estrutural foge da composição tradicional, pois neste caso não há vigas e todo o conjunto de lajes é sustentado pelos apoios pontuais, no caso os pilares. Simplificação de perdas e gastos no processo executivo, bem como possibilidades de alterações nos lay-out em ambientes internos, são algumas das vantagens desse tipo de laje (BRAVARESCO, 2010).

Para Hauch (2010) qualquer forma estrutural exige que os resultados dos cálculos e considerações dimensionais proporcionem segurança e durabilidade para a edificação, além de satisfação e conforto dos futuros usuários. Nessa vertente, o autor salienta que para garantir os termos mencionados é necessária à realização de uma análise rigorosa no que tange a estabilidade global em estruturas de concreto armado, principalmente quando as edificações apresentam grandes alturas.

A estabilidade global de uma edificação, pode ser identificada em casos que a estrutura da mesma está imposta a deslocamentos laterais expressivos ou apresentam esforços complementares, devido a ações no sentido vertical, e conseguem agir no estado em que a mesma está deformada, nesse momento é considerado o efeito de segunda ordem na estrutura. Tal efeito é associado aos parâmetros de instabilidade (parâmetro α e coeficiente γz) aos quais podem ser vistos como “avaliadores da sensibilidade” em uma análise estrutural e obtidos a partir de ferramentas computacionais (BUENO, 2009).

Para que se garanta a segurança de edificações, quanto à análise de sua estabilidade global, deve-se colocar em prática tanto conceitos técnicos acerca do tema, quanto desenvolver cálculos que justifiquem tal condicionamento, sejam por meio de softwares comerciais da área ou até mesmo de forma analítica. Tais fatores respaldam a importância e motivação do desenvolvimento deste trabalho, os quais são direcionados para um sistema estrutural com lajes lisas. Esse sistema fornece vantagens executivas e de uso, destacando a economia com fôrmas (processo executivo) e layouts mais espaçosos.

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo analisar a estabilidade global de um edifício em concreto armado, cujo sistema estrutural é composto apenas por lajes e pilares, caracterizando assim o sistema de lajes lisas. Nesse sentido, pretende-se contribuir com o entendimento dessa tipologia estrutural por ser um tema pouco abordado e por apresentar singularidades que fogem dos sistemas, convencionalmente, utilizados. Nesse sentido, são aplicados os métodos de análises: modelo de pórtico espacial (MPE) e processo P-Delta, cujo processamento e resultados são obtidos pelo software AltoQi Eberick V8, e o modelo de pórtico plano (MPP) e método dos pórticos planos associados (MPPA), que é realizado com o auxílio do software Ftool 3.0.

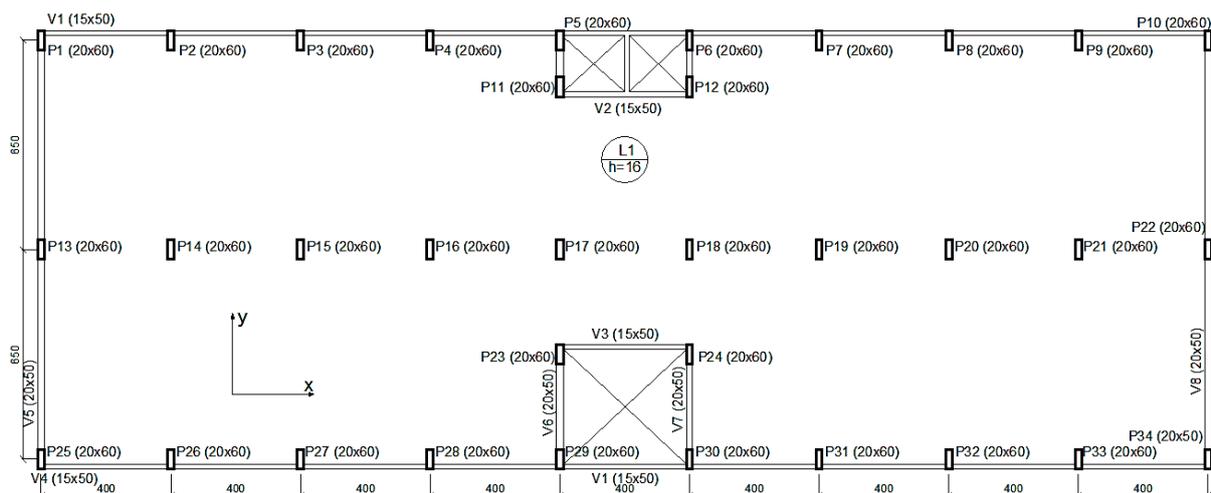
2 Materiais e Métodos

Nos itens a seguir são retratados, com mais detalhes, os materiais e métodos a serem utilizados.

2.1 Dados geométricos do sistema estrutural

Trata-se de uma planta de forma que apresenta, em seu escopo, a configuração de lajes lisas com presença de vigas nas bordas. Tal planta (Figura 2) pode ser considerada, neste caso, como objeto de estudo.

Figura 2. Planta dos pavimentos tipo em malha retangular



Fonte: Autores, 2020.

O edifício possui pavimento térreo, seis pavimentos tipos com o pé direito de 2,90 m e um pavimento de cobertura, resultando em uma altura total de 20,30 m. Em suma, o sistema estrutural do edifício é composto por laje lisa, com altura definida pela NBR 6118 (ABNT, 2014) de 16 cm, 34 pilares com dimensões iguais de 20 cm × 60 cm e vigas de borda com dimensão de 20 cm × 50 cm e 15 cm × 50 cm, como dispostos na Figura 6.1. É possível observar, ainda pela Figura 2, que na direção x os pilares possuem espaçamento de 4,0 m, já na direção y, os pilares possuem espaçamento de 6,5 m. A utilização das vigas de borda é importante para melhorar a estabilidade global da edificação em estudo e por compor um sistema estrutural comumente utilizado em edifícios com lajes lisas.

2.2 Considerações sobre o modelo de pórtico espacial

As lajes lisas ou lajes planas estão entre os diversos módulos de cálculo estrutural inseridos no software AltoQi Eberick V8, o qual possibilita projetar lajes planas apoiadas diretamente sobre os pilares ou ainda contendo capitéis na região dos pilares. Neste caso, além das verificações realizadas para o sistema estrutural convencional, o aplicativo apresenta verificação da laje quanto à punção, a partir dos perímetros críticos determinados segundo a geometria da laje, efetuando de forma completa todo o dimensionamento das lajes planas e lajes cogumelo (ALTOQI EBERICK, 2014).

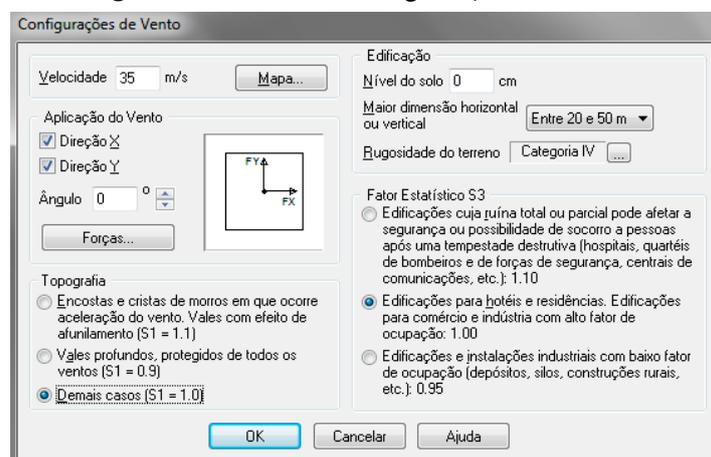
2.2.1 Considerações dos carregamentos e combinações

Com relação aos carregamentos considerados, torna-se necessário separá-los em permanentes e variáveis, para posterior combinação. Dentre as ações permanentes, considerou-se o peso próprio dos elementos estruturais com base no peso específico do concreto, equivalente a 25 kN/m³, e um carregamento conjunto, definido como

carga adicional, o qual refere-se à utilização de contra-piso, forro e tubulações, sendo atribuído para o mesmo um valor de 1,5 kN/m². Para as cargas variáveis utilizou-se, com base na Tabela 2 da NBR 6120 (ABNT, 2019), um valor de 1,5 kN/m², por se tratar de um edifício de uso residencial.

Na Figura 3 podem ser verificadas as configurações utilizadas, neste trabalho, para definição da força de vento. Por se tratar de uma edificação localizada na região sudeste do estado de Goiás, a velocidade básica do vento é de 35 m/s (de acordo com o mapa das isopletas – Seção 5.1, Figura 1 da NBR 6123 (ABNT, 2003)), Fator Topográfico (S1) igual a 1,0, considerando terreno plano ou fracamente acidentado, Categoria de Rugosidade IV (S2), Classe da edificação B (S2) e Fator Estatístico (S3) igual a 1,0 (edificações para hotéis e residências). Levando em consideração que a média da altura das edificações vizinhas é inferior ao dobro da altura da edificação em estudo, atribuiu-se neste caso a ocorrência de um vento de baixa turbulência.

Figura 3. Janela “Configuração de vento”



Fonte: AltoQi Eberick V8, 2018.

Em relação à consideração dos carregamentos, será estabelecida a combinação última normal a fim de se obter os esforços de primeira e segunda ordem de cálculo, de acordo com a Eq. 1.

$$N_d = \gamma_g \cdot F_{gk} + \gamma_q \cdot \left(F_{q1k} + \sum \psi_{0j} \cdot F_{qjk} \right) \quad \text{Eq. 1}$$

F_{gk} são as ações permanentes diretas;

F_{qjk} é a ação variável principal;

F_{qjk} é ação variável secundária, se existir;

γ_g é o coeficiente de ponderação das ações permanentes no ELU, igual a 1,4;

γ_q é o coeficiente de ponderação das ações variáveis no ELU, igual a 1,4;

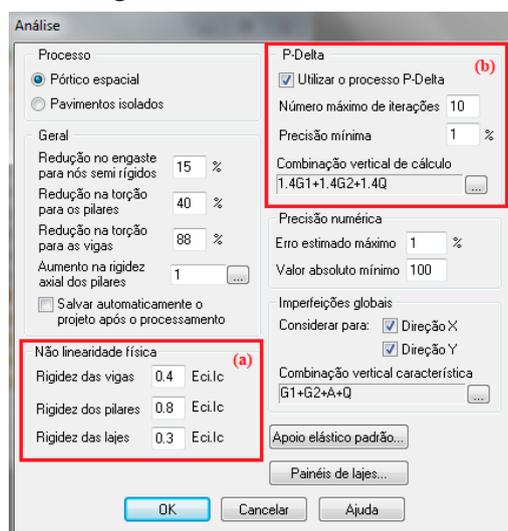
ψ_{0j} é o coeficiente redutor das ações variáveis secundárias no ELU, igual a 0,6 para vento e 0,5 para a ação acidental.

2.2.2 Configurações pertinentes para a análise estrutural

Nos exemplos utilizou-se para o concreto f_{ck} de 25 MPa, agressividade ambiental II, diâmetro de agregado igual a 19 mm e os cobrimentos nominais para os elementos estruturais conforme indicados na NBR 6118 (ABNT, 2014). Em relação à inércia dos elementos é considerado o cálculo da seção bruta do concreto (desconsiderando a fissuração) e o módulo de elasticidade utilizado é o módulo de elasticidade secante (Ecs) prescrito pela NBR 6118 (ABNT, 2014), sendo atribuído para o mesmo, neste caso, o valor de 23800 MPa.

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), a não linearidade física dos materiais deve ser simulada por meio de uma redução da rigidez à flexão dos elementos estruturais (lajes, vigas e pilares). Conforme se pode observar na Figura 4, configurou-se no *software* Eberick V8 os coeficientes redutores de rigidez, sendo considerada uma rigidez de 40%, 80% e 30% para vigas, pilares e lajes respectivamente.

Figura 4. Janela “Análise”



Fonte: AltoQi, 2020.

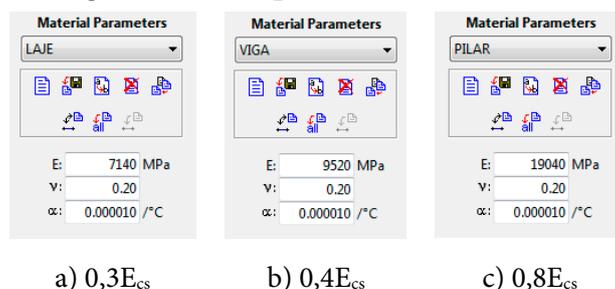
Com relação à análise dos efeitos de segunda ordem, o *software* Eberick V.8 permite a utilização do processo iterativo P-Delta. Logo, configurou-se o mesmo para que fossem feitas no máximo 10 iterações para alcançar convergência com uma precisão mínima de 1% entre a iteração i e a iteração $i - 1$, conforme Figura 4.

Sabendo-se que o *software* Eberick V8 calcula as lajes por meio de analogia de grelhas, foi necessário alterar o espaçamento entre as faixas para que houvesse concordância de nós entre a laje lisa e os pilares, sendo utilizado um espaçamento de 20 cm x 20 cm.

2.3 Considerações sobre o modelo de pórtico plano

Inicialmente foi necessário configurar os materiais para as lajes, vigas e pilares. De modo a se considerar a não linearidade física dos materiais, aplicou-se os parâmetros redutores de rigidez ao módulo de elasticidade secante uma vez que o *software* FTOOL não possui uma ferramenta de redução de rigidez. Podem-se observar os valores do módulo de elasticidade para cada elemento estrutural através da Figura 5.

Figura 5. Configurações dos parâmetros referentes aos materiais

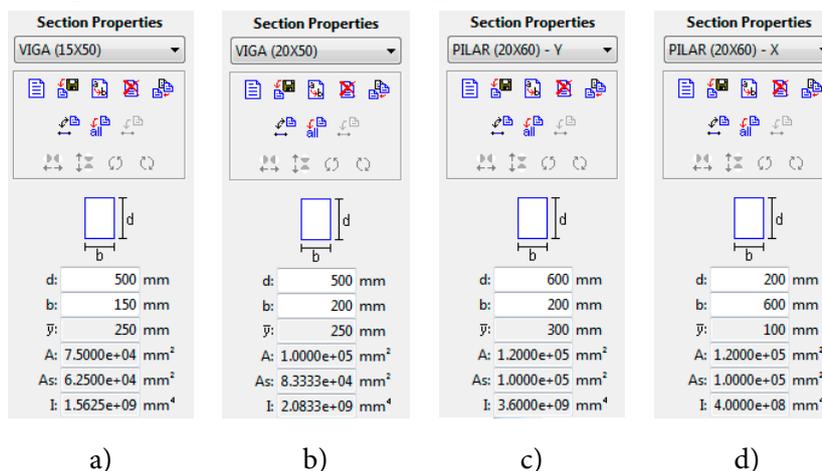


a) $0,3E_{cs}$ b) $0,4E_{cs}$ c) $0,8E_{cs}$

Fonte: Adaptado de FTOOL 3.0, 2018.

Deve-se definir a inércia da seção transversal das barras que compõe a estrutura. Sendo escolhida a forma da seção transversal pode-se definir as propriedades geométricas da mesma, conforme pode-se observar na Figura 6. É importante fazer menção à diferenciação feita no lançamento da seção dos pilares nas direções X e Y para uma adequação, uma vez que o Ftool é um *software* de análise plana, conforme Figura 6-a e Figura 6-b.

Figura 6. Configuração das propriedades geométricas de cada elemento estrutural



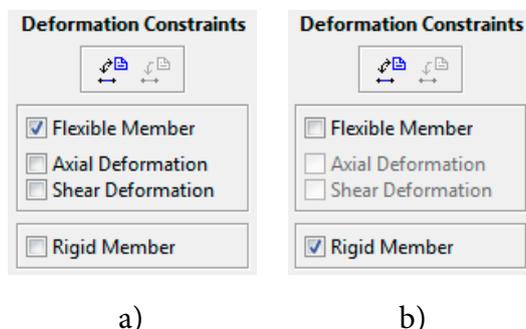
a) b) c) d)

Fonte: Adaptado de FTOOL 3.0, 2018.

As lajes foram simuladas como sendo diafráguas rígidos. O *software* FTOOL permite a manipulação da rigidez dos elementos de barra, sendo possível desconsiderar as deformações axiais tornando a barra rígida axialmente, conforme pode-se observar na Figura 7-a, assim como é possível desconsiderar todas as deformações, tornando

o membro rígido em relação à todos os esforços (Figura 7-b). No presente trabalho as lajes foram simuladas como elementos rígidos axialmente e como membros rígidos à todos os esforços e observou-se que ambas as condições conduziram à uma diferença desprezível. Logo, para análise comparativa e prosseguimento do estudo, utilizou-se as lajes como membros rígidos em relação à todos os esforços.

Figura 7. Configuração quanto a rigidez das lajes



Fonte: Adaptado de FTOOL 3.0, 2018.

2.3.1 Método do Pórtico Associado

Os pórticos planos associados podem apresentar, em seus nós (pontos de interseção dos elementos), ligações do tipo rígidas, semi-rígidas e flexíveis (FONTES, 2005). Dessa forma, para Barboza (2008), a rigidez pode ser definida como a propriedade de um material que possui a capacidade de agir contrariamente ao esforço aplicado no elemento, ou seja, o material é capaz de se manter indeformado.

Conforme relacionado por KIMURA (2007) existem três formas de relacionar a rigidez com os esforços gerados na estrutura, sendo estas: a rigidez à flexão que atua de acordo com um momento fletor, a rigidez axial para uma força normal e a rigidez à torção para um dado momento.

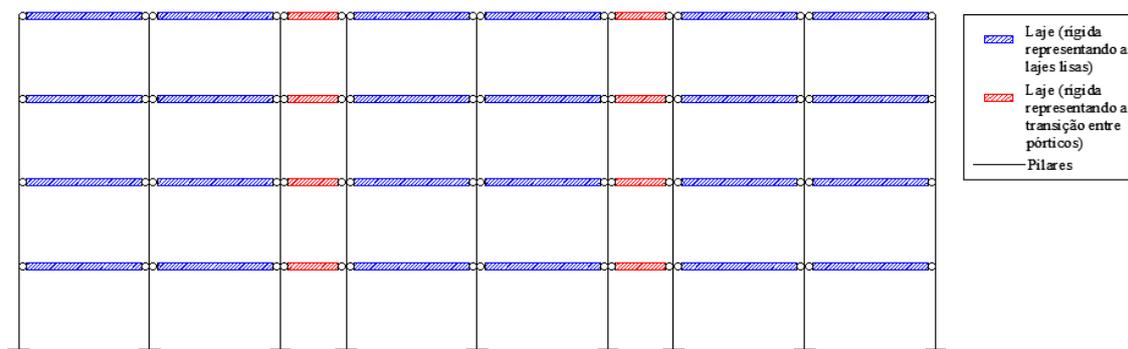
Barboza (2008) afirma que quanto mais rígida a estrutura como um todo, menores serão as deformações provenientes dos carregamentos aplicados na estrutura. No caso das ações horizontais sobre o edifício, a principal característica do elemento é sua rigidez à flexão, definida como o produto do módulo de elasticidade pela inércia à flexão do elemento. Desta forma, pode-se afirmar que, quanto maior a inércia em relação à direção do carregamento, maior será sua rigidez.

Em casos de lajes lisas, pelo fato de não haver vigas, um sistema de contraventamento formado por apenas pórticos capazes de resistir às solicitações laterais, não seria possível. No entanto, conforme prescreve a NBR 6118 (ABNT, 2014) no item 13.2.4, a espessura mínima para lajes maciças lisas, isto é, sem vigas, é de dezesseis centímetros. Tal espessura é suficiente para garantir o efeito do diafragma rígido e conseqüentemente o travamento dos pilares. O sistema de contraventamento principal mais comumente utilizado, para edifícios de múltiplos andares, é com núcleo

rígido. Esse sistema pode ser complementado com paredes estruturais, ou ainda, pilares-paredes isolados e convenientemente posicionados, com suas direções de maior rigidez perpendiculares entre si, a fim de estabilizar a edificação em todas as direções (FEITOSA; ALVES, 2015).

Na Figura 8 é apresentada uma nova configuração de associação para o caso de sistemas estruturais com lajes lisas, sem nenhum pórtico de contraventamento. Mediante tal configuração, se faz possível observar que os pilares são associados entre si por meio das lajes, que funcionam como diafragmas rígidos e são apoiadas por rótulas nas duas extremidades de contato (bi-rotuladas).

Figura 8. Associação de pilares representando o sistema com lajes lisas



Fonte: Autores, 2020.

3 Resultados e Discussões

A seguir tem-se os resultados obtidos por meio da aplicação modelo de pórtico espacial (MPE) e processo P-Delta, também denominados com “Eberick V8” nos gráficos, modelo de pórtico plano (MPP) e método dos pórticos planos associados (MPPA), também denominados como “Analítico” nos gráficos, juntamente com as suas discussões.

3.1 Consideração das ações e combinações

Quanto aos carregamentos verticais, no Quadro 1 tem-se os valores totais (ações permanentes + variáveis) obtidos pelo MPE, e pelo MPP (pesos dos elementos estruturais considerados separadamente), com a diferença de 1% entre os mesmos.

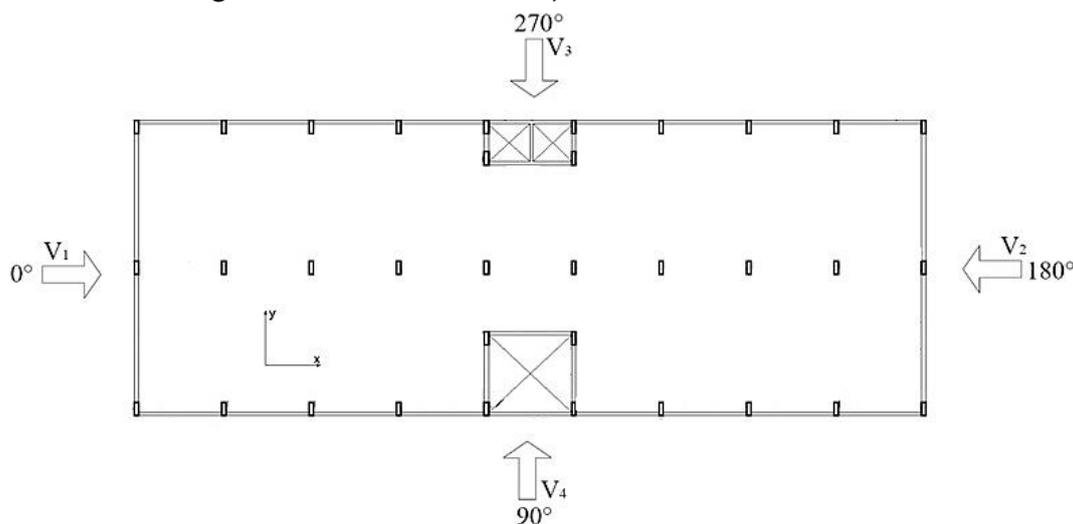
Quadro 1. Carregamentos verticais totais atuantes na edificação
(valores característicos)

Ações		MPE	MPP
Permanentes	G1 - Peso próprio (kN)	16458,53	16361,86
	G2 - Adicional (kN)	7456,19	7294,98
Variáveis	Q - Acidental (kN)	4789,73	4761,30
Total (kN)		28704,45	28418,14

Fonte: Autores, 2020.

Em seguida, analisou-se a ação do vento atuando na edificação, sendo que a mesma se trata de um carregamento horizontal, variável e disposto de forma concentrada nos nós de cada pavimento considerado. Nessa vertente, tem-se que os resultados alcançados com o vento a 0° (V_1) e a 180° (V_2) são praticamente os mesmos, assim como os resultados alcançados a 90° (V_4) e a 270° (V_3). Assim serão dispostos neste trabalho somente os valores obtidos com o vento atuando nas direções a 0° (direção X) e a 90° (direção Y). As condições de atuação da carga de vento na estrutura estão apresentadas na Figura 9.

Figura 9. Sentidos da atuação do vento na estrutura



Fonte: Autores, 2020.

Após as considerações da atuação do vento, se faz possível obter os coeficientes de arrasto nas direções X e Y da edificação, e conseqüentemente, através destes coeficientes aferirem os cálculos das forças de arrasto em ambas as direções. Nesse sentido, seguindo as preconizações dadas pela NBR 6123 (ABNT, 1988) e os fatores que regem tal consideração (dados no item 6.1 deste), foram obtidas as intensidades das forças de arrasto expostas no Quadro 2 pelo MPE, e no Quadro 3 pelo o MPP.

Quadro 2. Intensidade da força de arrasto - MPE (valores característicos)

Pavimento	Nível	S2	Coeficiente de Arrasto X	Coeficiente de Arrasto Y	F _k	F _k
	(cm)				Direção X (kN)	Direção Y (kN)
Cobertura	2030,00	0,91	0,79	1,22	9,22	39,24
6	1740,00	0,89	0,79	1,22	17,85	76,22
5	1450,00	0,87	0,79	1,22	17,07	72,79
4	1160,00	0,85	0,79	1,22	16,09	68,77
3	870,00	0,82	0,79	1,22	15,01	63,96
2	580,00	0,78	0,79	1,22	13,44	57,58
1	290,00	0,70	0,79	1,22	11,08	47,19
Térreo	0,00	0,33	0,79	1,22	1,18	5,10

Fonte: Autores, 2020.

Quadro 3. Intensidade da força de arrasto - MPP (valores característicos)

Pavimento	Nível	S2	Coeficiente de Arrasto X	Coeficiente de Arrasto Y	F _{a_k}	F _{a_k}
	(cm)				Direção X (kN)	Direção Y (kN)
Cobertura	2030,00	0,91	0,79	1,22	9,26	39,61
6	1740,00	0,89	0,79	1,22	17,82	76,22
5	1450,00	0,87	0,79	1,22	17,03	72,83
4	1160,00	0,85	0,79	1,22	16,11	68,87
3	870,00	0,82	0,79	1,22	14,99	64,10
2	580,00	0,78	0,79	1,22	13,54	57,92
1	290,00	0,71	0,79	1,22	11,39	48,70
Térreo	0,00	0,33	0,79	1,22	1,19	5,08

Fonte: Autores, 2020.

Com os valores das forças de arrasto para a direção X e Y, se torna possível lançar tal carregamento no MPP. Vale ressaltar que, os valores das forças de vento foram aplicados nas condições supracitadas já apresentando valores combinados, no Estado Limite Últimos (ELU), para dois casos distintos, sendo o primeiro com o vento (0° e 90°) atuando como variável principal (1,40V) e o segundo com o vento (0° e 90°) atuando como variável secundária (0,84¹V). Por meio do Quadro 4 verificam-se os valores de cálculos obtidos para as forças de vento atuantes.

1 Valor correspondente ao produto entre o , igual a 0,6, e o , igual a 1,40.

Quadro 4. Forças de vento combinadas no ELU

Pavimento	Força de arrasto característica		Vento como variável principal		Vento como variável secundária	
	$F_{a_k} 0^\circ$ (kN)	$F_{a_k} 90^\circ$ (kN)	$F_{a_d} 0^\circ$ (kN)	$F_{a_d} 90^\circ$ (kN)	$F_{a_d} 0^\circ$ (kN)	$F_{a_d} 90^\circ$ (kN)
Cobertura	9,26	39,61	12,97	55,45	7,78	33,27
6	17,82	76,22	24,95	106,71	14,97	64,03
5	17,03	72,83	23,84	101,96	14,30	61,17
4	16,11	68,87	22,55	96,42	13,53	57,85
3	14,99	64,10	20,98	89,73	12,59	53,84
2	13,54	57,92	18,96	81,08	11,38	48,65
1	11,39	48,70	15,94	68,18	9,57	40,91
Térreo	1,19	5,08	1,66	7,11	1,00	4,27

Fonte: Autores, 2020.

Os carregamentos, obtidos e expostos no Quadro 4, foram aplicados no modelo estrutural de pórtico plano a fim de se obter, para esse método, os valores de deslocamentos gerados para cada configuração apresentada.

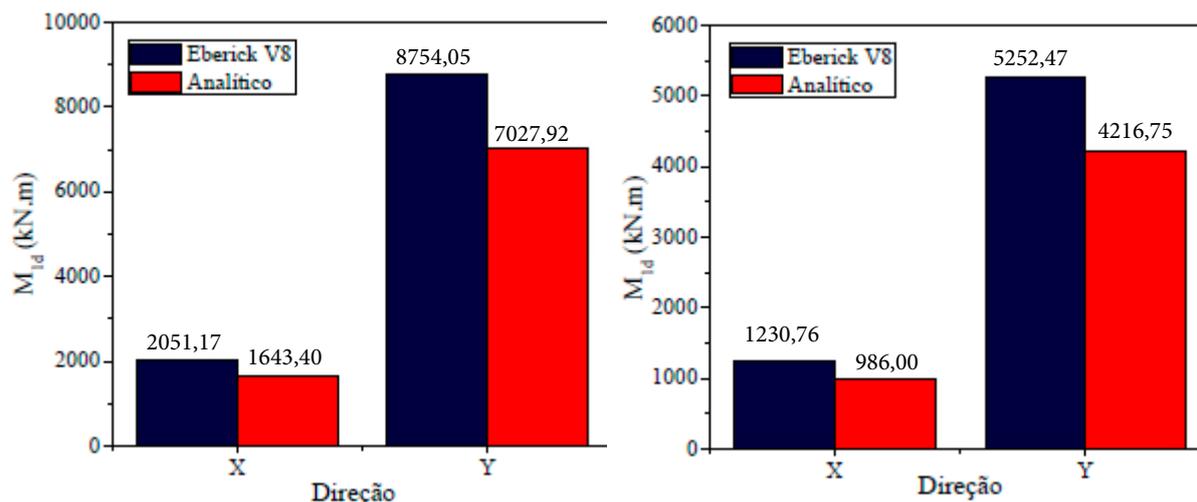
3.2 Momentos de primeira ordem (M_{1d}) ou Momento de tombamento

A obtenção dos momentos de primeira ordem pelo MPE (*software* Eberick V8) e pelo MPP (Ftool 3.0) se deram a partir dos seus respectivos valores de momento de tombamento, isto é, pela soma dos momentos produzidos pelas forças horizontais em relação à base da estrutura.

Dessa forma, para consideração de tal momento, no modelo de pórtico plano, foi preciso atribuir a um pilar, equivalente aos demais, as cargas concentradas presentes em cada nó de pavimento, da base até o topo. Sendo assim, foi possível alcançar, pelo *software* Ftool 3.0, os valores correspondentes aos momentos de primeira ordem quando as cargas do vento são variáveis principais e quando são variáveis secundárias.

Pela Figura 10 verificam-se os valores do momento de tombamento para as quatro situações desenvolvidas até o momento (direções X e Y, vento como variável principal e secundária) de acordo com resultados obtidos pelos dois *softwares*.

Figura 10. Momentos de primeira ordem obtidos pelos softwares em cada direção (X e Y)



a) Vento como variável principal (1,4·V)

b) Vento como variável secundária (0,84·V)

Fonte: Autores, 2020.

Observa-se na situação em que o vento é variável principal o momento de primeira ordem na direção X obtido pelo MPE foi 24,81% maior que o alcançado pelo MPP, já para a direção Y essa variação foi de 24,56%.

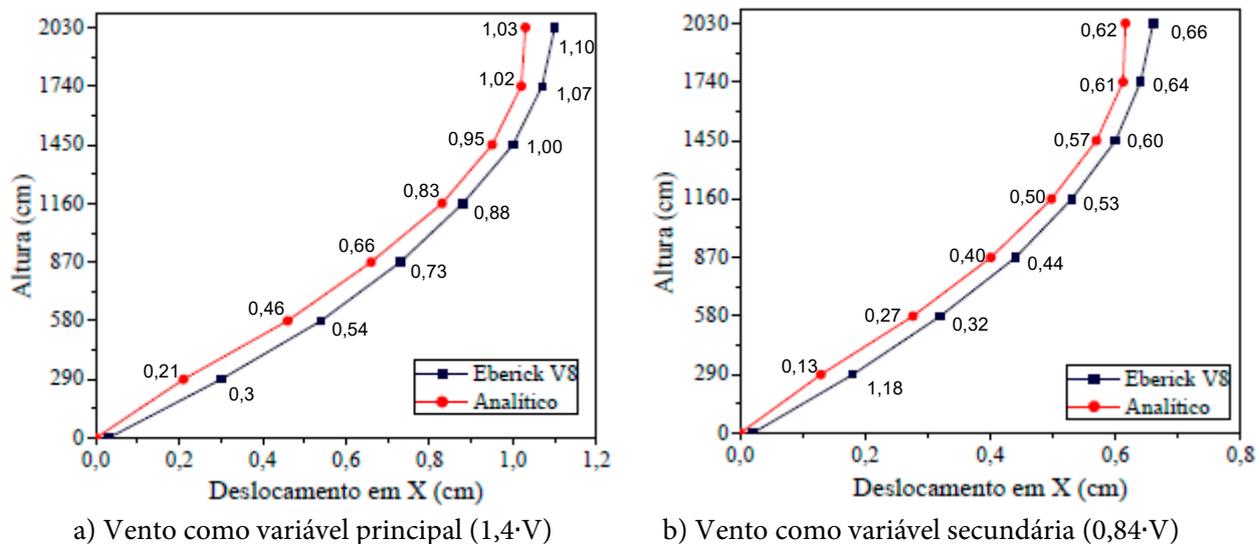
Para a segunda situação, em que o vento é considerado variável secundária, o momento de primeira ordem dado pelo MPE na direção X foi 24,82% maior que o obtido pelo MPP, enquanto para a direção Y essa discrepância foi de 24,56%.

3.3 Momentos de segunda ordem (M_{2d})

Em suma, os momentos de segunda ordem podem ser obtidos em posse de dois dados, sendo estes: os carregamentos combinados e os deslocamentos sofridos pela estrutura.

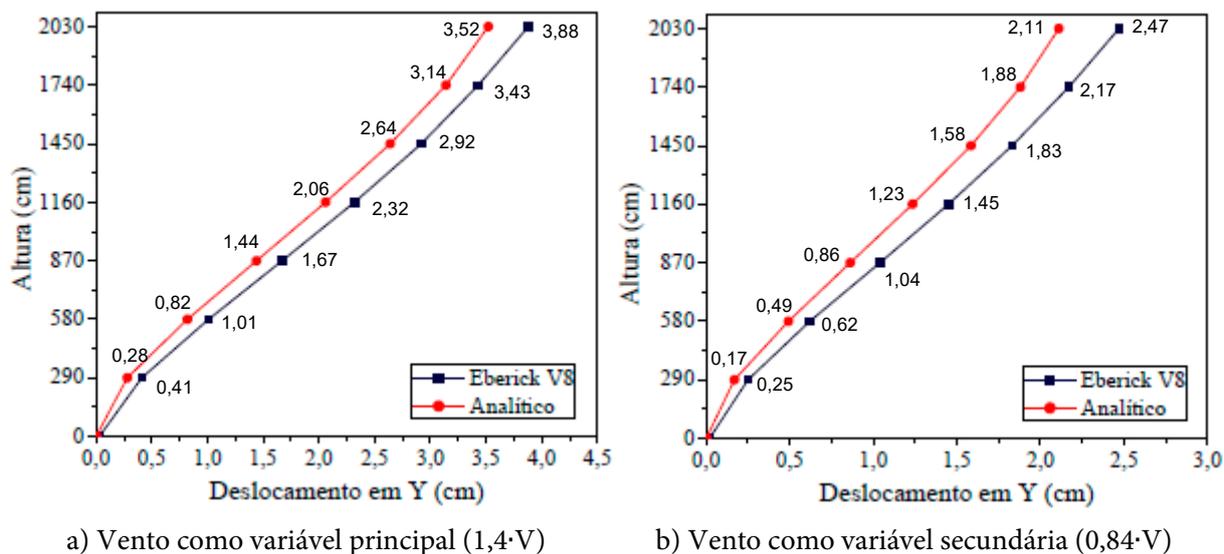
Neste trabalho, considerou-se a combinação, entre as ações permanentes e variáveis, de acordo com a que se demonstrou mais crítica pelo memorial de cálculo gerado pelo *software* Eberick V8, ao final de toda análise. Como tal combinação refere-se a uma situação em que a ação do vento é considerada como variável secundária e o carregamento acidental como variável principal buscou-se, também, expor os resultados cuja combinação se configura o contrário desta, ou seja, o vento é considerado como variável principal e a carga acidental como variável secundária. Essa nova análise traz mais dados à pesquisa que posteriormente podem ser discutidos. Dessa maneira, nas Figuras 11 e 12 são apresentados os valores obtidos pelos dois métodos em estudo, ou seja, levando em consideração as combinações e deslocamentos alcançados para MPE pelo processo P-Delta e para o MPP pelo MPPA, ou modelo analítico.

Figura 11. Deslocamentos ocorrentes na estrutura devido ao vento de 0°



Fonte: Autores, 2020.

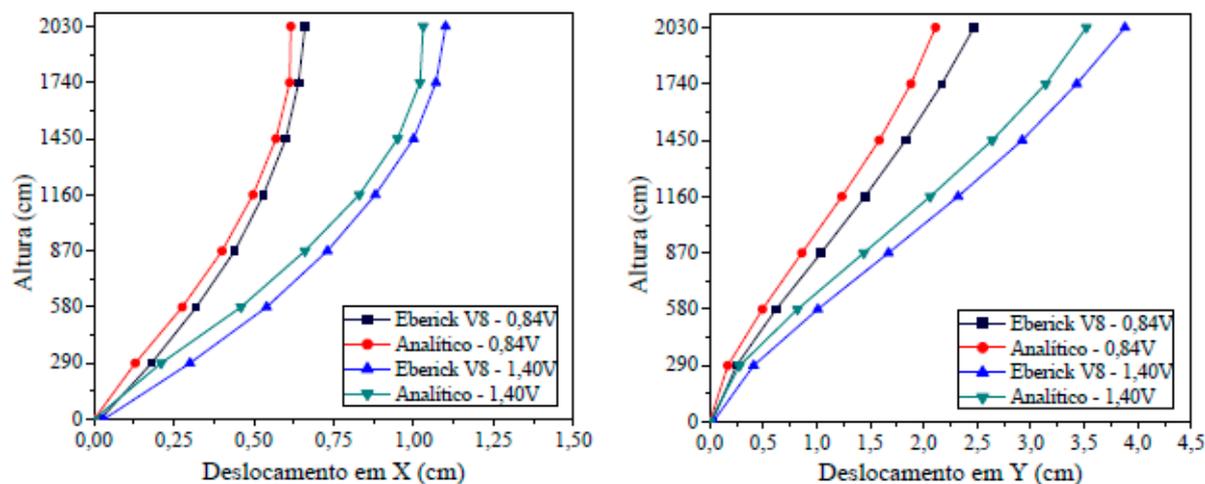
Figura 12. Deslocamentos ocorrentes na estrutura devido ao vento de 90°



Fonte: Autores, 2020.

Na Figura 13 verifica-se um resumo dos deslocamentos analisados para as duas situações de combinações, de acordo com as duas direções do vento e com o método aplicado.

Figura 13. Resumo dos deslocamentos analisados na estrutura devido a ação do vento

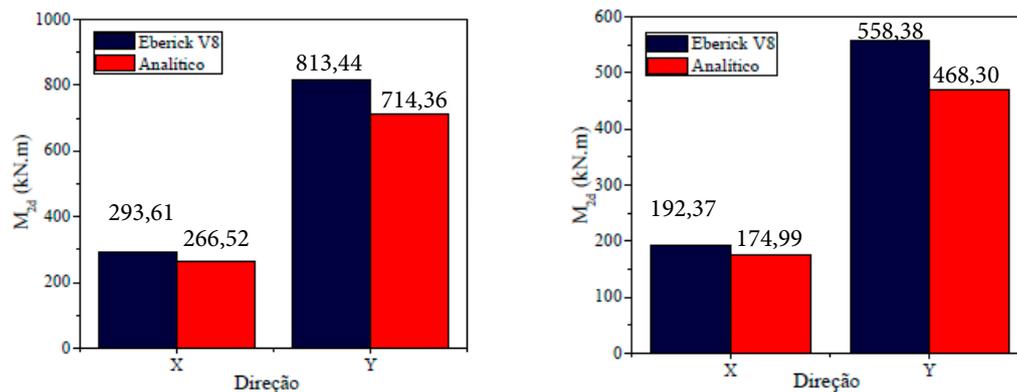


a) Combinações com o vento a 0° b) Combinação com o vento a 90°

Fonte: Autores, 2020.

Conforme se observa pela Figura 13 a estrutura proposta pelo modelo analítico demonstrou-se mais rígida em relação ao MPE processado pelo *software* Eberick V8. Isso justifica o fato dos momentos de primeira ordem do modelo analítico terem sido menores do que os obtidos pelo *software* Eberick V8. Por fim, pela Figura 14 observam-se os momentos de segunda ordem aferidos a partir dos dois tipos de combinações supracitadas e pelos deslocamentos horizontais que ocorrem ao longo da altura de toda edificação.

Figura 14. Momentos de segunda ordem obtidos pelos dois métodos em estudo



a) Vento como variável principal (1,4·V) b) Vento como variável secundária (0,84·V)

Fonte: Autores, 2020.

Verifica-se que para a situação em que o vento é variável principal o momento de segunda ordem na direção X, obtido para o MPE (Eberick V8), foi 10,16% maior que o alcançado para o MPP (analítico), já para a direção Y essa variação foi de 17,87%. Enquanto, para a segunda situação, em que o vento é considerado variável secundária, o momento de segunda ordem alcançado pelo MPE (Eberick V8) na direção X foi

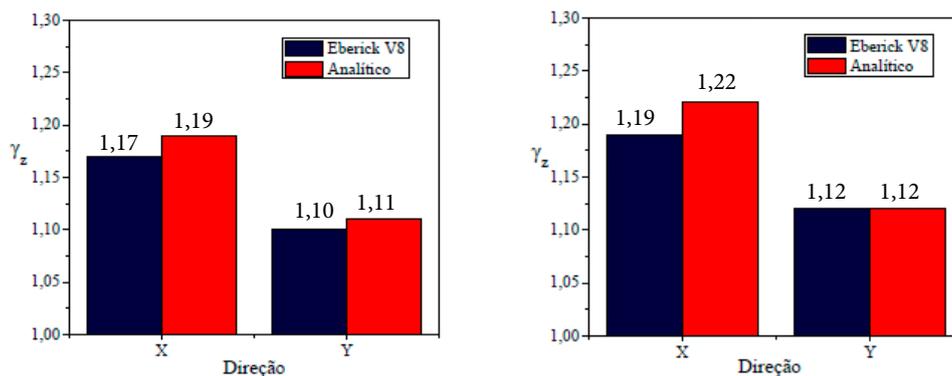
9,93% maior que o obtido para o MPP (analítico), enquanto para a direção Y essa discrepância foi de 19,23%.

Tais resultados se apresentam coerentes nessa análise, uma vez que a estrutura imposta ao MPE (Eberick V8) se mostrou, relativamente, mais deslocável em relação ao MPP (analítico). O fato de ela ser mais deslocável vem de encontro com os resultados obtidos para os deslocamentos no processo P-Delta, visto que esse processo é caracterizado por tratar o equilíbrio da estrutura na posição deslocada.

3.4 Coeficientes γ_z

Conforme pode ser visto pela Figura 15, os maiores valores de coeficientes γ_z deram para a condição em que o vento, nas duas direções, atua como variável secundária ($0,84 \cdot V$) e a carga acidental como variável principal ($1,4 \cdot Q$). Tal situação mostra que apenas pelos deslocamentos não se conclui sobre a identificação dos casos mais críticos para os coeficientes γ_z , pois os mesmos dependem da carga variável atuante na direção vertical, e neste caso refere-se à carga acidental (Q). Dessa forma, pela referida combinação a estrutura se mostrou mais instável.

Figura 15. Coeficientes obtidos pelos métodos em estudo



a) Vento como variável principal ($1,4 \cdot V$) b) Vento como variável secundária ($0,84 \cdot V$)

Fonte: Autores, 2020.

As porcentagens que diferem as condições apresentadas pela Figura 15 são bem significativas no que se referem os objetivos deste trabalho, pois quando o vento atua na direção X como variável principal o coeficiente γ_z , calculado pelo MPP (analítico) apresentou-se 1,71% maior que o calculado pelo MPE (Eberick V8), já para a direção Y essa variação foi de 0,91%.

Por outro lado, na circunstância mais crítica para o coeficiente γ_z , ou seja, quando o vento atua na direção X e Y como variável secundária, tem-se que para a direção X, calculado pelo MPP (analítico), o valor de γ_z foi 2,52% maior em relação ao obtido pelo dado pelo MPE (Eberick V8), enquanto para a direção Y não houve nenhuma discrepância nos valores.

4 Considerações finais

Em termos da análise dos efeitos de segunda ordem, foi possível identificar as etapas pelo qual o mesmo é encarado em termos de projeto estrutural. Dessa forma, o estudo das não-linearidades, bem como os métodos que julgam a ocorrência dos efeitos, contribuíram de forma significativa para o entendimento da estabilidade global de um dado edifício com certo número de pavimentos.

Quanto a aplicação do modelo de pórtico espacial (MPE) e processo P-Delta, e modelo de pórtico plano (MPP) e método dos pórticos planos associados (MPPA), os resultados alcançados para o coeficiente γ_z foram muito similares para os dois métodos, por se tratar de um parâmetro qualitativo. Porém, ressalta-se que quanto as estimativas de esforços de primeira e segunda ordem, os resultados obtidos demonstram que o método do pórtico plano associado não é conservador, não sendo recomendado o seu uso para fins de projeto e dimensionamento do sistema estrutural estudado, sendo indicado somente para casos de pré-dimensionamento.

Referências

- ALTOQI EBERICK. *Eberick V8*. Versão V.8, Florianópolis, 2020. Disponível em: <https://altoqi.com.br/downloads/>. Acesso em: 9 fevereiro 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto Armado*. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 256p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 6120: Ações para o cálculo de estruturas de edificações*. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. 66p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações*. Rio de Janeiro: ABNT, 1988. 66p.
- BARBOZA, M. R. *Concepção e análise de estruturas de edifícios em concreto armado*. 2008. 166f. Relatório Final de Iniciação Científica – FAPESP. Universidade Estadual Paulista – UNESP Campus de Bauru. Faculdade de Engenharia. Bauru, 2008.
- BAVARESCO, D. *Análise e dimensionamento de lajes lisas em concreto armado*. 2010. 84f. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Maringá, 2010.
- BUENO, M. M. E. *Avaliação dos parâmetros de instabilidade global em estruturas de concreto armado*. 2009. 105f. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil. Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília. Brasília, 2009.
- FEITOSA, A. L.; ALVES, E. C. Estudo da estabilidade global de edifícios altos com lajes protendidas. *IBRACON Structures and Materials Journal*, v. 8, n. 2, p. 196-224, (ISSN 1983-4195), 2015.
- FONTES, F. F. *Análise estrutural de elementos lineares segundo a NBR 6118:2003*. 2005. 137f. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
- FTOOL. *Ftool – Two-Dimensional Frame Analysis Tool*. Versão educacional 3.0, Rio de Janeiro, 2018.
- GUTIERRE, S. M. *Estudo sobre a contribuição das lajes na estabilidade global de edifícios*. 2016. 236f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro tecnológico. Florianópolis, 2016.
- HAUCH, A. da S. *Análise da Estabilidade Global de Estruturas de Concreto Armado*. 2010. 75f. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Departamento de Tecnologia. Ijuí, 2010.
- KIMURA, A. *Informática aplicada em estruturas de concreto armado: cálculos de edifícios com uso de sistemas computacionais*. São Paulo. Ed. Pini, 2007. 624p.
- SILVA, W. Q. *Sobre análise não-linear geométrica considerando o empenamento dos núcleos estruturais e a interação solo-estrutura*. 2014. 190f. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.