



INFLUÊNCIA DO P-DELTA EM ANÁLISES NÃO LINEARES DE SISMO E VENTO PARA DIFERENTES ALTURAS DE ESTRUTURAS

Mateus José Parente Soares do Nascimento

mateusengenharia1@gmail.com

Aluno de graduação

Nathaly Sarasty Narváez

nathaly.narvaez@uniceub.br

Professora

Centro Universitário de Brasília, 70790-075, Distrito Federal, Asa Norte, Brasil

Resumo. *O estudo da influência do P-Delta é de fundamental importância em edifícios muito altos. O impacto de cargas laterais, como as cargas sísmicas e de vento, cresce com o aumento da altura de um edifício. O efeito P-Delta é responsável por uma elevada parcela de esforços atuantes e deslocamentos adicionais causados pela aplicação de uma carga lateral. O presente estudo tem como objetivo analisar a influência do efeito P-Delta em modelos submetidos a cargas sísmicas e cargas de vento. Através do software de cálculo estrutural pelo método dos elementos finitos ETABS® v15.0, procura-se comparar as análises de influência do P-Delta para as forças horizontais por andar, momentos fletores por andar, deslocamentos por andar, reações máximas nos elementos estruturais e deslocamentos máximos. Os seis modelos utilizados nesse trabalho possuem o mesmo volume de ocupação, são simétricos, são regulares e diferenciados entre suas relações entre altura e área da base. O estudo de todas as comparações estabelece relações da porcentagem influente do efeito P-Delta entre os modelos e as diferenças do efeito P-Delta para ações sísmicas e ações do vento.*

Palavras-chave: *P-Delta, Análise não linear, Análise dinâmica, Sismo, Vento.*

1 INTRODUÇÃO

A eficiência estrutural é considerada como uma melhor utilização dos elementos da estrutura afim de reduzir o seu peso próprio e aumentar a capacidade de sustentação. Nas últimas décadas foram desenvolvidos diversos estudos afim de melhorar a eficiência estrutural para construir prédios cada vez mais altos (Nascimento, 2016). Edifícios altos são mais suscetíveis as ações laterais pelo maior momento de tombamento e efeito P-Delta.

O momento de tombamento nada mais é do que um momento fletor causado pela aplicação de uma carga lateral. O efeito P-Delta, um efeito causado por uma carga gravitacional em um deslocamento lateral, provoca variações no deslocamento e nas reações estruturais (Gupta, 1993). Para deslocamentos laterais de elevada magnitude, presentes em edifícios altos causados por cargas laterais como as sísmicas e as de vento, o efeito P-Delta provoca um grande impacto, tornando o seu estudo indispensável na análise estrutural (Powell, 2010).

Análises dinâmicas são necessárias para carregamentos que não se comportam de maneira estática, pois estas consideram as altas acelerações das cargas em comparação com a frequência natural da estrutura. Ações do vento se comportam de maneira dinâmica sobre uma estrutura, porém podem ser analisadas de maneira estática através de um coeficiente segundo normas como a *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE 7-10)*. Um espectro de resposta, gráfico de aceleração em função do tempo, é utilizado na análise dinâmica das cargas sísmicas.

Deslocamentos e conseqüentemente deformações elevadas não são estimadas exatamente em uma análise linear da estrutura, pois comportamentos não lineares geométricos devido ao P-Delta e não lineares físicos devido ao comportamento inelástico do material tornam uma análise não linear necessária (Deierlen et al., 2010). No caso da dinâmica estrutural, uma análise com base na história do tempo apresenta resultados satisfatórios para um comportamento não linear (Guerreiro, 1999).

O presente trabalho tem como objetivo analisar a influência do efeito P-Delta para cargas sísmicas e devido ao vento em modelos isovolumétricos diferenciados em relação as suas alturas e áreas dos pavimentos.

2 METODOLOGIA

Os 7 modelos utilizados no presente trabalho possuem o mesmo distanciamento entre pilares, alturas entre andares iguais, mesmas dimensões dos elementos estruturais, volumes iguais, são simétricos e diferenciados pelas relações entre as alturas e a áreas dos pavimentos.

São realizadas análises da influência do P-Delta nas reações na estrutura e deslocamentos por andar, bem como a comparação da influência do efeito P-Delta nos deslocamentos máximos, reações máximas nos pilares e reações máximas nas vigas.

2.1 Modelos

O material utilizado nos 6 modelos é concreto isotrópico com peso próprio de 25 kN/m³, resistência característica à compressão de 30 MPa, módulo de elasticidade de 330000 MPa e coeficiente de Poisson de 0,2.

O volume de ocupação dos modelos é de 110.592 m³, sendo todas as áreas quadradas, as dimensões das vigas são de 30x60 cm, as dimensões dos pilares de 60x60 cm, as lajes com 15

cm de espessura, o espaçamento entre pilares de 4 m, a altura dos andares de 3 m e todos os apoios da base são fixos.

Considerando todos os modelos isovolumétricos, as variações de altura para uma área de base quadrada estão dadas pela equação $x^2y = 110592$, aonde x é o comprimento da base e y a altura. Para todos os números inteiros positivos e uma altura máxima de 192 metros, as soluções são mostradas na Tabela 1. Os modelos em vista tridimensional são exibidos na Fig. 1.

Tabela 1. Dados dos modelos

Modelo	Altura	Comprimento
1	3 metros	192 metros
2	12 metros	96 metros
3	27 metros	64 metros
4	48 metros	48 metros
5	108 metros	32 metros
6	192 metros	24 metros

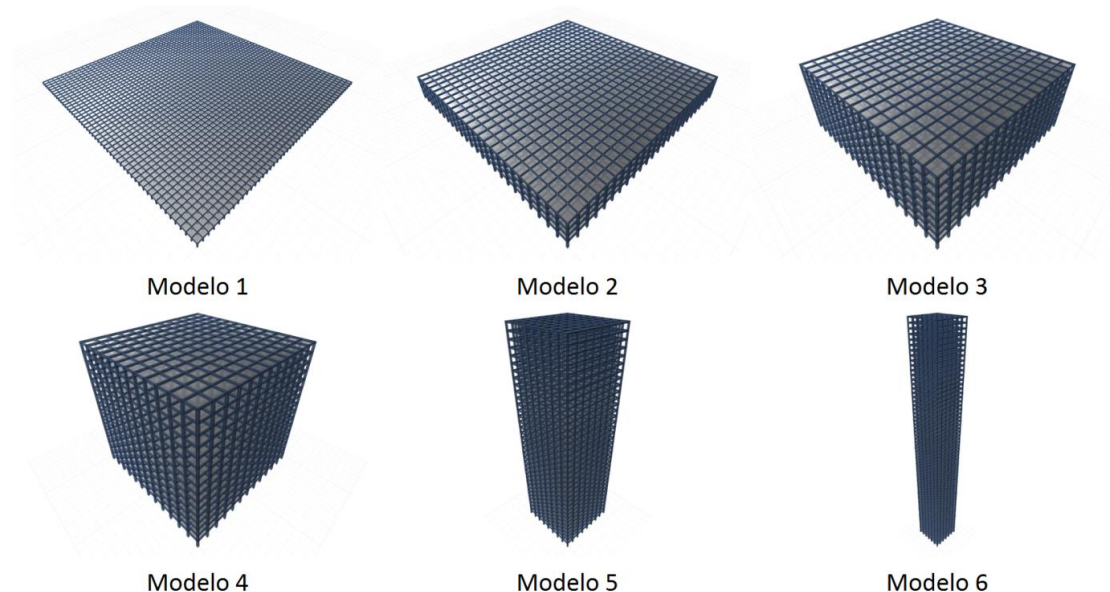


Figura 1. Modelos em vista tridimensional

2.2 Cargas Laterais

As cargas sísmicas seguem a norma *ASCE 7-10*. O espectro de resposta das cargas sísmicas é feito com base nos dados da *Unified Facilities Criteria (UFC-13)* seguindo a probabilidade de 1% de colapso estrutural em 50 anos referente a cidade de Quito, no Equador, aonde considera-se uma aceleração aos 0,2 segundos de 2,12g e a 1 segundo de 0,82g conforme informações disponíveis do Serviço Geológico dos Estados Unidos e estudos recentes (Chavez

et al., 2012). A taxa de amortecimento é considerada de 5%, padrão para estruturas de concreto, o solo é rochoso de classe B e são considerados 12 casos modais.

Com o objetivo de ter resultados satisfatórios para os modelos altos, é utilizada uma análise não linear considerando a história do tempo respectiva ao padrão disponível pelo ETABS v15.0 ou nas bibliotecas e manuais da Computer and Structures, Inc. (2016) para cargas sísmicas, combinado com a curva do espectro de resposta através do domínio do tempo. Para efeito comparativo, o sismo atua no mesmo eixo translacional do plano para todos os modelos. As forças horizontais na base para a mesma carga sísmica causadas em todo o tempo de análise com a inclusão do efeito P-Delta estão descritas na Fig. 2 para cada modelo.

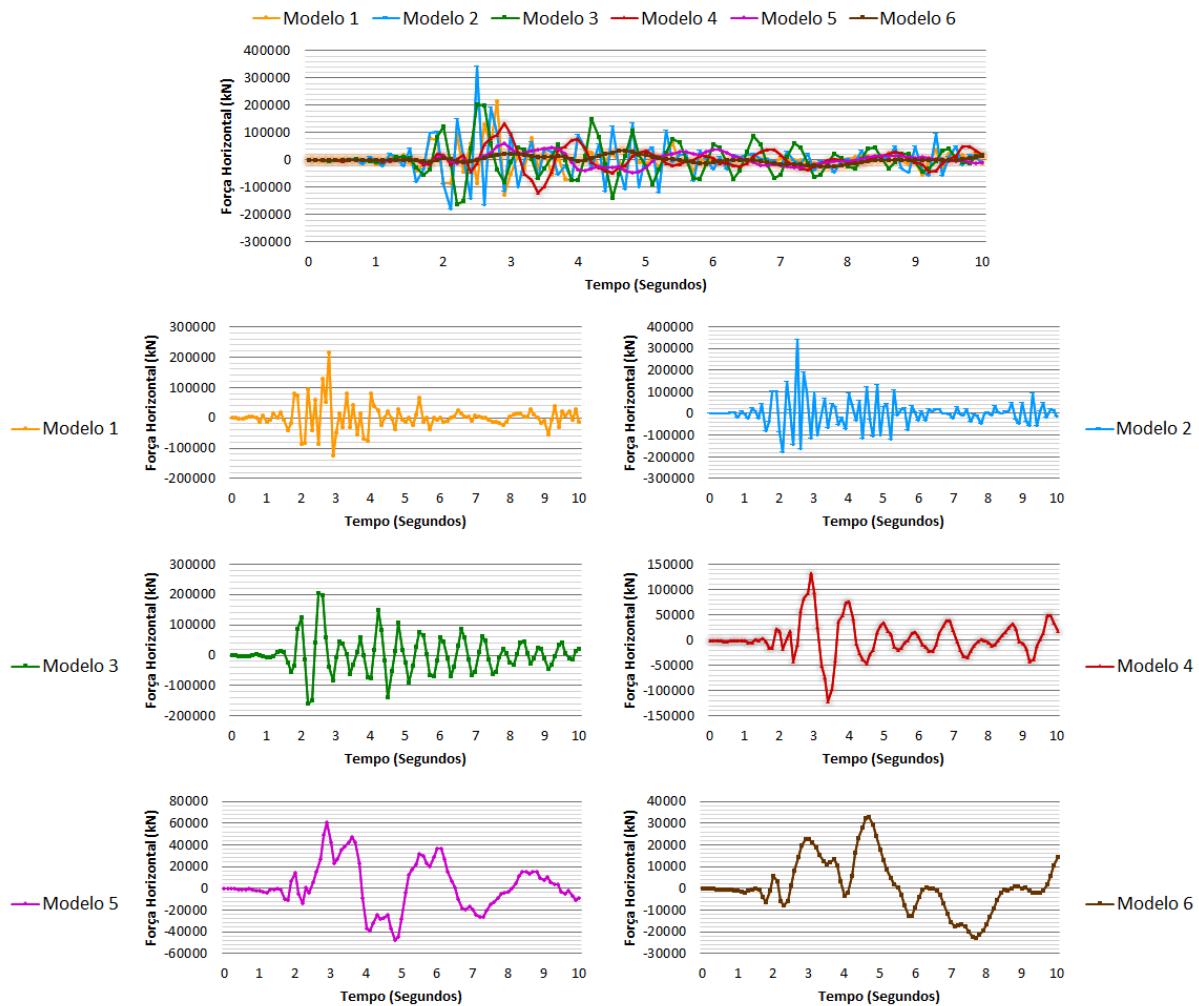


Figura 2. Gráficos de histórias no tempo das forças horizontais na base dos modelos para o mesmo sismo

Para maiores áreas do plano dos modelos com contato com a base e conseqüente menores alturas, maiores são as forças horizontais totais transmitidas para a estrutura pela atividade sísmica e mais próximos são os gráficos das forças horizontais transmitidas com o gráfico da história no tempo determinada. As forças horizontais na base sem o efeito P-Delta apresentam uma leve diferença as forças horizontais na base com o efeito P-Delta.

As cargas devido ao vento também seguem a norma ASCE 7-10, sendo considerado uma velocidade básica do vento de 55 m/s aplicada em somente um eixo no sentido translacional paralelo a uma das quatro faces simétricas dos modelos. A categoria de exposição é considerada

como B, para áreas urbanas, o fator topográfico é considerado como 1, para terrenos planos, o fator do efeito de rajada é considerado como 0,85, permitido para edifícios rígidos e o fator de direcionalidade é também utilizado com o valor de 0,85 de acordo com Ellingwood (1981) e Ellingwood et al. (1982), levando em conta a probabilidade reduzida da carga máxima do vento vir da mesma direção e a baixa probabilidade de coeficientes de pressão atingirem o valor máximo em uma mesma direção.

Dada a finalidade de obter resultados precisos para modelos altos, as análises de cargas devido ao vento são realizadas de forma não linear estática, com base no procedimento para adaptação estática da norma *ASCE 7-10* e no incremento contínuo de carga obtendo-se os resultados finais ao longo do tempo. Assim como as cargas sísmicas, para efeito comparativo, as cargas de vento são aplicadas na mesma direção em um só eixo translacional para todos os modelos.

Tanto as cargas sísmicas como do vento são transmitidas para os modelos através de diafragmas, considerando áreas de transferências rígidas. O efeito P-Delta é calculado com base no peso do próprio modelo, sem cargas gravitacionais adicionais.

Duas análises são feitas para cada modelo, uma com o efeito P-Delta e outra sem o efeito P-Delta. Os resultados são dispostos em influência do P-Delta para o tipo de reação ou deslocamento a ser analisado, sendo a influência do P-Delta, uma simples subtração da reação ou deslocamento com o efeito pela reação ou deslocamento sem o efeito e posterior divisão pela reação ou deslocamento sem o efeito, exposta em porcentual de influência.

3 ANÁLISE DE RESULTADOS

Primeiramente, analisando os resultados das respostas das estruturas obtidos pelas análises não lineares dinâmicas para cargas sísmicas e não lineares estáticas para cargas de vento após a aplicação completa das cargas, obtemos os gráficos da Fig. 3.

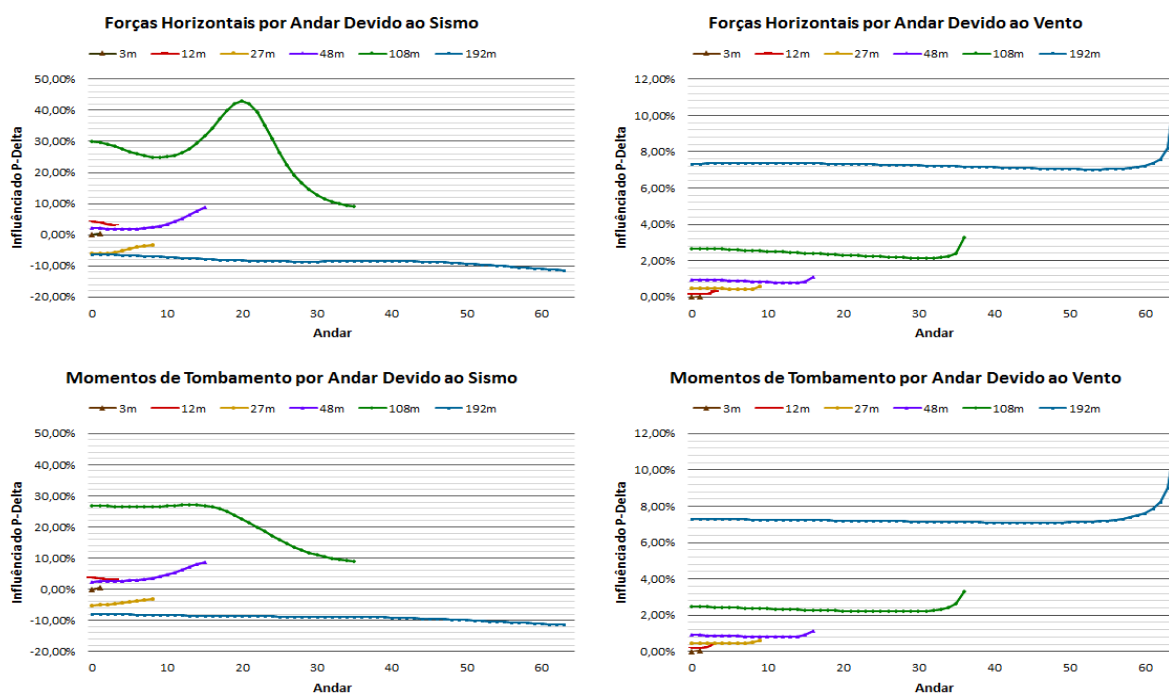


Figura 3. Porcentagem da influência do efeito P-Delta nas reações por andar da estrutura

Os resultados obtidos pela aplicação das cargas sísmicas no último segundo do carregamento, aos 10 segundos, mostraram a tendência do aumento da influência do P-Delta com o aumento da altura dos modelos, porém estes resultados não estão claros devido as diferentes respostas das estruturas para a história no tempo, sendo que nos modelos de 27 metros e 192 metros, o efeito P-Delta ajudou os modelos a obterem melhores resultados em comparação com a análise sem o efeito P-Delta.

Para os resultados referentes a aplicação das cargas de vento, é observado o claro aumento da influência do efeito P-Delta com o aumento da altura da estrutura, sendo que em todas as análises das forças horizontais da estrutura nota-se uma influência aproximadamente linear ao longo de todos os andares, com exceção daqueles próximos ao topo, aonde é sofrido uma maior influência.

Passando para os resultados referentes aos deslocamentos horizontais por andar sofridos pelas cargas laterais aplicadas, obtém-se os gráficos da Fig. 4.

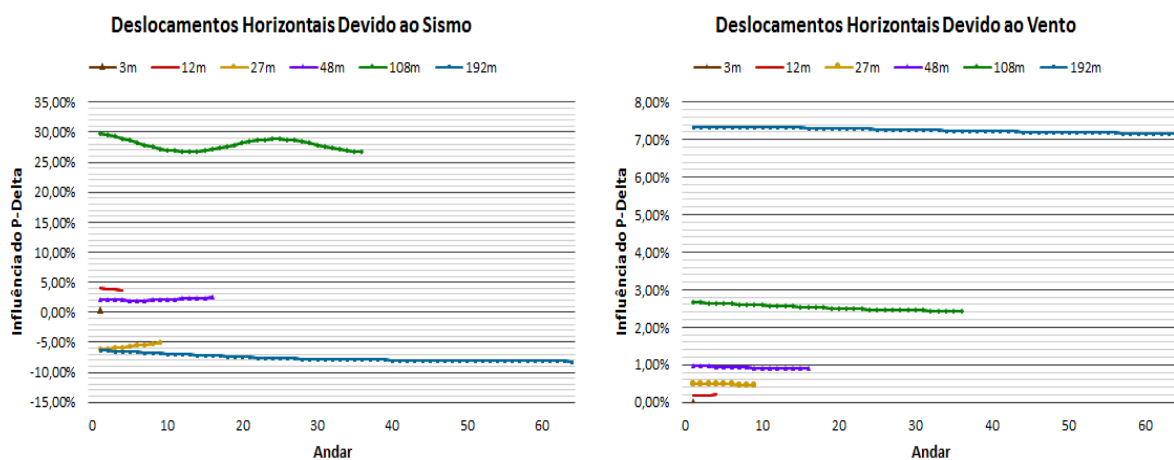


Figura 4. Porcentagem de influência do efeito P-Delta nos deslocamentos por andar

Assim como nos resultados para reações na estrutura por andar, os modelos de 27 metros e de 192 metros apresentaram uma melhora de desempenho com a aplicação do efeito P-Delta para atividades sísmicas no mesmo tempo de análise, aos 10 segundos. O modelo que mais sofreu influência do efeito P-Delta no deslocamento horizontal para atividades sísmicas aos 10 segundos foi o de 108 metros.

Nos deslocamentos horizontais sofridos pelo vento, percebe-se uma resposta linear da influência do P-Delta ao longo dos andares para todos modelos. Assim como nas reações da estrutura, nota-se o aumento da influência conforme o aumento da altura.

Para os deslocamentos máximos absolutos e as reações máximas absolutas nas vigas e nos pilares durante todo o tempo de aplicação das cargas nos modelos, extrai-se os gráficos da Fig. 5. Vale ressaltar que, para as atividades sísmicas, os deslocamentos máximos absolutos e reações máximas absolutas não ocorrem necessariamente no último segundo de aplicação, mas em algum ponto durante a história no tempo, já para as cargas devido ao vento, como o incremento de carga é contínuo, os deslocamentos e reações máximas são os mesmos obtidos no final de aplicação.

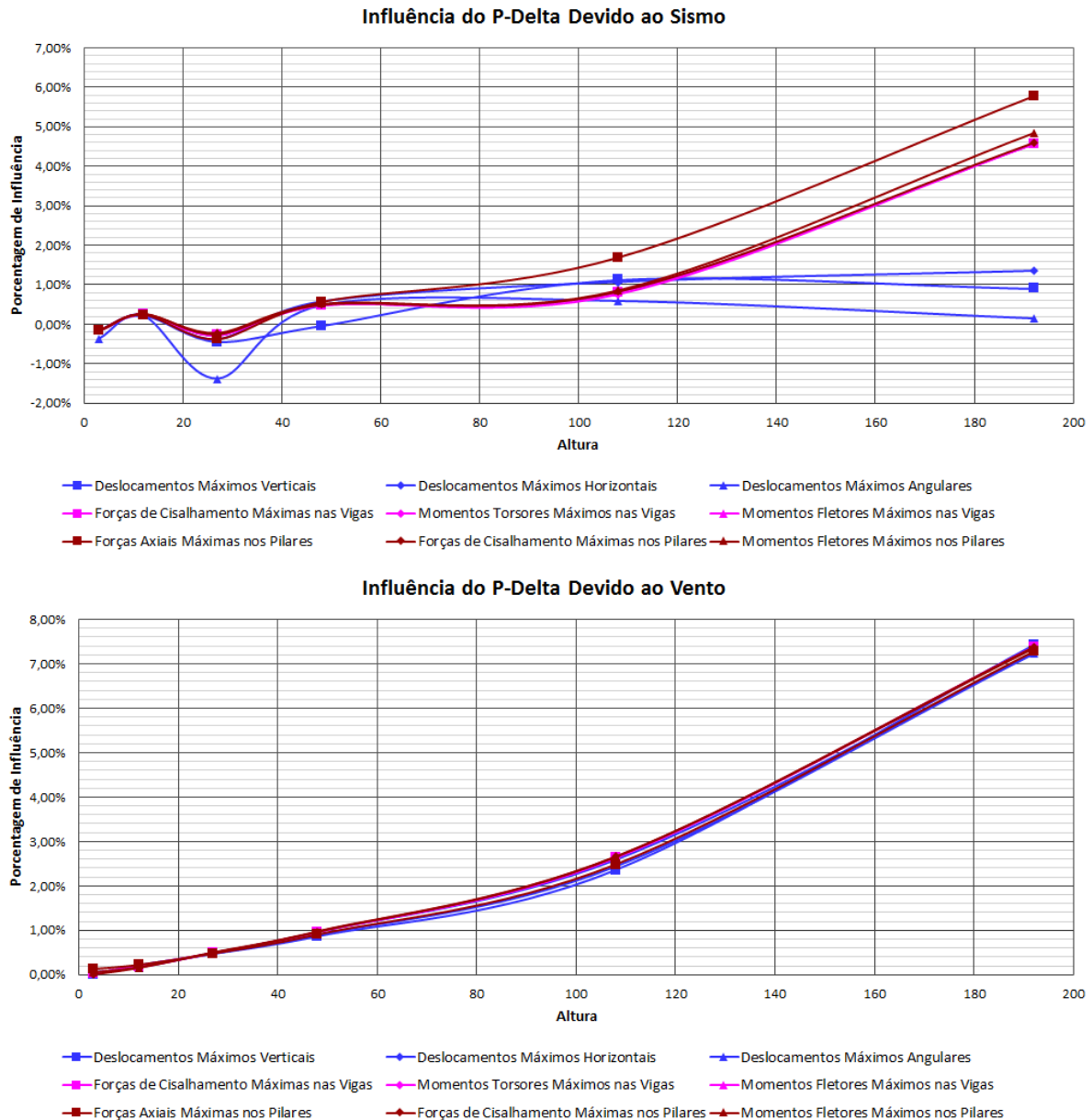


Figura 5. Porcentagem de influência do efeito P-Delta nas vigas, nos pilares e nos deslocamentos máximos

Na influência do P-Delta para o vento, tanto as reações máximas nos pilares e nas vigas, quanto os deslocamentos máximos, apresentam resultados bem próximos um dos outros para os modelos analisados até 192 metros, sendo que, para as reações máximas nas vigas, os resultados são praticamente iguais tanto para os momentos torsores, momentos fletores e forças de cisalhamento para todos os modelos.

A maior influência do P-Delta com o aumento da altura é perceptível nas reações e deslocamentos máximos para o vento aplicado, alcançando os resultados máximos de 7,38% de influência para as reações nas vigas analisadas e as forças de cisalhamento nos pilares no modelo de 192 metros.

No gráfico de cargas sísmicas, observa-se alguns valores negativos na porcentagem de influência, no que é dedutível o melhor desempenho para análise com o efeito P-Delta ao longo da história no tempo. A maioria dos valores encontrados são maiores para os modelos mais

altos, porém em alguns casos, o aumento da altura não condiz com o aumento da influência do P-Delta.

Comparando os dois gráficos, o de vento e o de cargas sísmicas, é notado maiores valores de influência do P-Delta para a aplicação de cargas de vento do que cargas sísmicas, afinal as cargas de vento tem maior magnitude em alturas maiores, provocando assim maiores deslocamentos nos andares superiores. Quanto mais distante o deslocamento horizontal for da base, maior vai é o momento causado pela aplicação de um peso no deslocamento, portanto, maior é o efeito P-Delta.

4 CONCLUSÃO

Dadas as diferenças de localização de aplicação das cargas sísmicas para as cargas de vento em um edifício, aonde as cargas sísmicas são transmitidas pelo solo e as de vento ao longo da lateral do edifício, é de notória observação a maior influência do P-Delta para as ações do vento do que em ações sísmicas, comprovado em uma exemplificação com modelos isovolumétricos diferenciados entre altura e área da base.

Como o efeito P-Delta é dado através de um momento gerado por cargas gravitacionais em um deslocamento, a sua porcentagem de influência na estrutura é proporcional ao deslocamento, a intensidade da carga gravitacional e a altura da estrutura para aplicação de cargas de vento, porém em uma análise não linear de cargas sísmicas, a porcentagem de influência do P-Delta nem sempre depende desses fatores.

No que diz respeito as atividades sísmicas ao longo de uma história no tempo, conclui-se a dificuldade de analisar a influência do P-Delta dada as diferentes respostas da estrutura para a mesma carga aplicada, como visto na comparação no mesmo tempo, aos 10 segundos, das reações da estrutura por andar, aonde há uma súbita melhoria de desempenho provocada pela aplicação do efeito P-Delta. Tal resultado acontece pela aplicação de forças horizontais tanto no sentido positivo como no negativo gerada pela história no tempo de um terremoto, sendo o que realmente acontece na prática.

Nas cargas de vento, aonde a direção de aplicação de forças é somente uma, há um crescente aumento da porcentagem de influência com o aumento da altura dos modelos, aonde esta porcentagem cresce rapidamente, tornando indispensável a inclusão do efeito P-Delta em edifícios submetidos a cargas laterais. Pode-se afirmar com este estudo que edifícios mais baixos são mais eficientes quanto a influência do P-Delta quando aplicadas cargas de vento comparados aos mais altos de mesmo volume, porém não necessariamente por ser mais baixo ele sofrerá menos impacto do P-Delta para cargas sísmicas, aonde a disposição das forças atuantes na base do edifício causa diferentes comportamentos ao longo da história no tempo.

Lembrando que os resultados obtidos neste trabalho incluem um P-Delta com consideração somente do peso próprio do modelo. Em um caso prático, os resultados obtidos não devem ser utilizados, pois não é só o peso próprio de um edifício que atua em sentido gravitacional, existem também as cargas permanentes adicionais, as cargas acidentais e as combinações com outros tipos de cargas. Para um caso prático, a porcentagem de influência do P-Delta é bem maior do que os resultados apresentados, tornando este estudo puramente teórico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Universitário de Brasília (UnICEUB) por possibilitar a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

American Society of Civil Engineers, 2010. *ASCE 7-10: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. Estados Unidos.

Chavez, J., Khemici, O., Khater, M., Keshishian, P., 2012. *Building Codes and Relative Seismic Vulnerability in Latin American Countries*. Lisboa: 15 WCEE.

Computer and Structures, Inc., 2016. *Technical Knowledge Base: Acceleration, Modeling techniques, Response spectrum analysis, P-Delta effect, Time-history analysis, Pushover, Modal analysis and Nonlinear*. California.

Computer and Structures, Inc., 2016. *User's Guide ETABS® 2015 Integrated Building Design Software*. California.

Deierlein, G. G., Reinhorn, A. M., Willford, M. R., 2010. *Nonlinear Structural Analysis for Seismic Design*. NEHRP Seismic Design Technical Brief No. 4., NIST GCR 10-917-5. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology.

Departamento de Defesa dos Estados Unidos, 2014. *Structural Engineering design document*. Unified Facilities Criteria 3-301-01. Estados Unidos.

Ellingwood, B., 1981. *Wind and snow load statistics for probabilistic design*. J. Struct. Div., 107(7), 1345–1350. Estados Unidos.

Ellingwood, B., MacGregor, J. G., Galambos, T. V., Cornell, C. A., 1982. *Probability based load criteria: Load factors and load combinations*. J. Struct. Div., 108(5), 978–997. Estados Unidos.

Guerreiro, L., 1999. *Revisões de Análise Modal e Análise Sísmica por Espectro de Respostas. Apontamentos da disciplina de dinâmica e engenharia sísmica*. Mestrado em Engenharia de Estruturas. Instituto Superior Técnico. Portugal.

Gupta, A. K., Moss, P. J., 1993. *Guidelines for Design of Low-Rise Buildings Subjected to Lateral Forces*. Boca Raton: CRC Press. p. 49. ISBN 0-8493-8969-0.

Nascimento, M. J. P. S., 2016. *Análise da influência do formato de edifícios submetidos a cargas gravitacionais e laterais na eficiência estrutural*. Brasil.

Powell, G. H., 2010. *Modeling for Structural Analysis: Behavior and Basics*. Primeira Edição. Berkeley, CA: Computers and Structures, Inc.

Serviço Geológico dos Estados Unidos, 2016. *Worldwide Seismic Design Tool (Beta)*. Estados Unidos.