

# AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE GLOBAL EM EDIFÍCIOS DE CONCRETO ARMADO PELO COEFICIENTE GAMA-Z E PROCESSO P-DELTA

## **Edrwins Hanmses Neto Pereira**

Engenheiro Civil. Aluno de Pós-Graduação em Instalações prediais. Universidade Potiguar. E-mail: edrwinsneto@hotmail.com

## **Carlos Martins Oliveira**

Engenheiro Civil. Aluno de MBA em Projetos, Execução e Desempenho de Estruturas e Fundações. Universidade Potiguar. E-mail: cmartins1@hotmail.com

## **Hérbete Hálamo Rodrigues Caetano Davi**

Mestre em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Potiguar. E-mail: herbete.davi@unp.br

**ENVIO EM:** Setembro de 2015

**ACEITE EM:** Março de 2016

**RESUMO:** Neste trabalho é estudado a estabilidade global em edifícios de concreto armado, onde são analisados os efeitos globais de segunda ordem considerando a não linearidade física e a não linearidade geométrica de elementos estruturais. São analisados três modelos de estruturas distintas, discretizados como pórticos planos no programa FTOOL, com a aplicação de duas hipóteses de combinações de ações, uma com o vento como principal e outra com o vento como ação secundária. Para a quantificação dos efeitos de segunda ordem, inicialmente utiliza-se o coeficiente Gama-z na avaliação da necessidade ou não de se considerar os efeitos de segunda ordem na estrutura, bem como a utilização desse coeficiente como majorador dos efeitos de primeira ordem para a obtenção dos esforços finais, e na sequência é avaliado o processo iterativo P-Delta na estimativa dos esforços finais da estrutura, assim como a comparação deste com o coeficiente Gama-z. Na finalização do estudo apresenta-se as conclusões sobre a utilização do Gama-z e do P-Delta na análise da estabilidade global das estruturas de concreto armado.

**Palavras-chave:** Estabilidade global. Análise de segunda ordem. Gama-z. P-Delta.

### **EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD GLOBAL EN EDIFICIOS DE HORMIGÓN ARMADO POR EL COEFICIENTE GAMMA-Z Y PROCESO P-DELTA**

**RESUMEN:** En este trabajo es estudiada la estabilidad global en edificios de hormigón armado, donde son analizados los efectos globales de segunda orden considerando la no linealidad física y la no linealidad geométrica. Son analizados tres modelos de distintas estructuras, describiendo como pórticos planos en el programa FTOOL, con la aplicación de dos hipótesis de combinaciones de acciones, una con el viento como principal y otra con el viento como secundario. Para la cuantificación de los efectos de segunda orden, inicialmente se utiliza el coeficiente Gamma-z en la evaluación de la necesidad o no, de considerarse los efectos de segunda orden en la estructura, bien como la utilización de este coeficiente como mayorador de los efectos de primera orden para la obtención de los esfuerzos finales, y en la secuencia es evaluado el proceso iterativo P-Delta en la estimativa de los esfuerzos finales de la estructura, así como la comparación de lo mismo con el coeficiente Gamma-z. En la finalización del estudio se presenta las conclusiones sobre la utilización del Gamma-z y del P-Delta en el análisis de la estabilidad global de las estructuras de hormigón armado.

**Palabras-Clave:** Estabilidad global. Análisis de segundo orden. Gamma-z. P-Delta.



## 1 INTRODUÇÃO

As estruturas de concreto devem ser projetadas, construídas e utilizadas de modo que, sob as condições de uso ambientais previstas e respeitadas as condições de manutenção preventiva especificadas no projeto, conservem sua segurança, estabilidade, aptidão em serviço e aparência aceitável, durante um período pré-fixado de tempo. Além disto, devem apresentar adequado consumo de materiais e otimização dos recursos. Uma importante etapa dos procedimentos para atender a esses requisitos, quando necessária, é a verificação da estabilidade global da estrutura e a consideração dos efeitos de 2ª ordem na estrutura.

A avaliação da estabilidade global em edifícios é indispensável na atualidade. Entre os vários motivos pode-se citar o avanço tecnológico do concreto, o qual tem possibilitado a obtenção de peças de concreto de elevada resistência, que podem chegar a mais de 100 Mega Pascal (MPa). Isso tem permitido a construção de estruturas de concreto mais altas, mais esbeltas e com grandes vãos. Há poucas décadas a resistência usual era em torno de 15 MPa a 30 MPa. É justamente essa realidade que impõe condições diferentes de análise da estrutura, especialmente em relação às verificações da estabilidade global para esse cenário de novos materiais e novas tipologias das estruturas. Tal realidade nos conduz a busca de soluções para a problemática de como realizar avaliação global de uma edificação.

Fruto disso, os objetivos gerais e específicos deste trabalho se propõe a contribuir para a avaliação da estabilidade global de um edifício de concreto armado. Nesse estudo foram modelados três edifícios com tipologias estruturais diferentes; com cinco, nove e treze pavimentos. Serão, também, feitas análises numéricas dos modelos no programa computacional FTOOL, utilizando modelos de pórticos planos, constituídos por vigas e pilares, para se avaliar o parâmetro de instabilidade simplificado (Gama-z), previsto na ABNT NBR 6118 (2014) e a análise dos efeitos de segunda ordem através do método P-Delta.

Para a consecução dos objetivos propostos o trabalho será desenvolvido por meio das seguintes etapas: revisão bibliográfica, modelagem das estruturas, avaliação computacional do comportamento das estruturas modeladas, fruto dos esforços horizontais e verticais, bem como a interpretação e tratamento dos resultados.

Com relação à literatura sobre o tema proposto, a pesquisa foi baseada em teses de doutorados, monografias e em obras de autores pertinentes ao assunto, relacionadas nas referências deste estudo.

## 2 METODOLOGIA

O presente trabalho se classifica como uma pesquisa teórica com estudos de casos, pois se trata de um estudo de aplicação de teorias a três modelos de pórticos planos.

A pesquisa foi dividida em duas etapas: na primeira foram calculadas todas as ações do vento sobre as estruturas dos modelos; na segunda etapa foi analisada a estabilidade global das estruturas. Por sua vez, a segunda etapa foi subdividida em duas: avaliação do coeficiente Gama-z e a avaliação do processo P-delta.

Os dados foram coletados da seguinte maneira: Para cálculo das ações do vento foi consultada a norma NBR 6123 (1988), além de aplicar essa pesquisa à região do município de Natal do Estado do Rio Grande do Norte, do qual foram consultados os dados climáticos e topográficos da região.

Para a avaliação da estabilidade global dos modelos, foi adotado o  $f_{ck}$  de 40 MPa para a resistência do concreto e os procedimentos de cálculos foram realizados de

acordo com as NBR 6118 (2014) e NBR 6120 (1980), além de bibliografias complementares devidamente identificadas neste trabalho.

O estudo dos modelos foi baseado em pórticos planos na direção da menor inércia do edifício, onde os elementos de barras são representados por seus eixos geométricos, que conseguem representar a estrutura com um grau de precisão que torna usualmente dispensável o uso de modelos mais elaborados.

Foram propostos três modelos para se avaliar a estabilidade global da estrutura.

- Modelo I – Edificação com cinco pavimentos;
- Modelo II – Edificação com nove pavimentos;
- Modelo III – Edificação com treze pavimentos;

Em cada um dos modelos analisou-se duas hipóteses de combinações de ações para a determinação do Gama-z e a hipótese considerada mais crítica para o processo P-Delta.

- **Na primeira hipótese (1):** considerou-se o vento (esforço horizontal) como ação principal:

$$H_{vi} = \gamma_f \cdot H_{ki}, \text{ para } \gamma_f = 1,4 \quad (1)$$

$$P_{tot} = \gamma_f \cdot P_{gi} + \psi_0 \cdot \gamma_f \cdot P_{qi}, \text{ sendo } \psi_0 = 0,5 \text{ e } \gamma_f = 1,4 \quad (2)$$

- **Na Segunda hipótese (2):** considerou-se a ação do vento como secundária:

$$H_{vi} = \psi_0 \cdot \gamma_f \cdot H_{ki}, \text{ para } \gamma_f = 1,4 \text{ e } \psi_0 = 0,6 \quad (3)$$

$$P_{tot} = \gamma_f \cdot P_{gi} + \gamma_f \cdot P_{qi}, \text{ para } \gamma_f = 1,4 \quad (4)$$

Sendo:

i – número do andar considerado.

n – número do total de andares do edifício.

$P_{gi}$  – resultante vertical do peso próprio no andar i.

$\gamma_f$  – coeficiente de majoração das cargas no Estado Limite Ultimo (ELU).

$\psi_0$  – fator de redução de combinação para ELU para ações variáveis secundárias, a favor da segurança.

$P_{qi}$  – resultante vertical da ação acidental considerada secundária no andar i.

A metodologia empregada, de modo sistemático, para o cálculo do coeficiente Gama-z, consistiu das seguintes etapas:

- cálculo das forças horizontais devidas ao vento;
- cálculo das forças verticais devido ao peso próprio da estrutura, o revestimento e a cargas acidentais;
- majoração dos esforços de acordo com as hipóteses 1 e 2;
- modelação das estruturas I, II e III no FTOOL. Considerando as seções adotadas para as vigas e pilares e a redução da inércia da estrutura, segundo a expressão:  $(EI)_{sec} = 0,7 \cdot E_{ci} I_c$ ;
- avaliação dos deslocamentos dos pórticos, fruto dos esforços horizontais, no FTOOL;
- cômputo dos esforços em primeira ordem e dos acréscimos de momentos;
- cálculo dos valores do coeficiente Gama-z, para os três modelos, levado em consideração as duas hipóteses;
- avaliação dos resultados obtidos.

O programa utilizado de apoio a avaliação da estabilidade global foi o FTOOL. É um programa que se destina análise do comportamento estrutural de pórticos planos. É

uma ferramenta simples, que une em uma única interface recursos para a criação e manipulação do modelo (pré-processamento) aliado a uma análise da estrutura rápida e transparente e a uma visualização de resultados rápida e efetiva (pós-processamento). No presente estudo essa ferramenta foi utilizada para a obtenção dos resultados de análise estrutural dos pórticos, referentes aos deslocamentos horizontais da estrutura.

Para os cálculos do processo P-Delta seguiram-se as seguintes etapas:

- inicialmente fez-se uma análise de primeira ordem (estrutura indeformada) considerando o carregamento horizontal e vertical. Os deslocamentos ( $\Delta$ ) obtidos para cada pavimento foram transformados em cargas horizontais fictícias e consideradas na estrutura para nova análise;

- obteve-se os deslocamentos de cada pavimento pela análise de primeira ordem;
- calculou-se os deslocamentos relativos ( $\Delta a$ ) de cada pavimento pela fórmula 11:

$$\Delta a = a_i - a_{(i-1)}$$

- considerando a carga vertical atuante ( $P_{tot}$ ) em cada pavimento  $i$ , a distância  $h$  entre os andares e a força horizontal majorada ( $H_v$ ), calculou-se as forças  $F_i$  totais pela formulação 12:

$$F_i = (P_{tot} \times \Delta a / h) + H_v$$

- as forças fictícias ( $F_i$ ) foram adicionadas ao carregamento horizontal original da estrutura e fez-se nova análise;

- para cada iteração, novas forças  $F_i$  foram encontradas e isto se sucedeu até que os valores dos momentos na base da estrutura convergiram para um erro aceitável, em nosso estudo um por cento;

- avaliação dos resultados do processo P-delta.

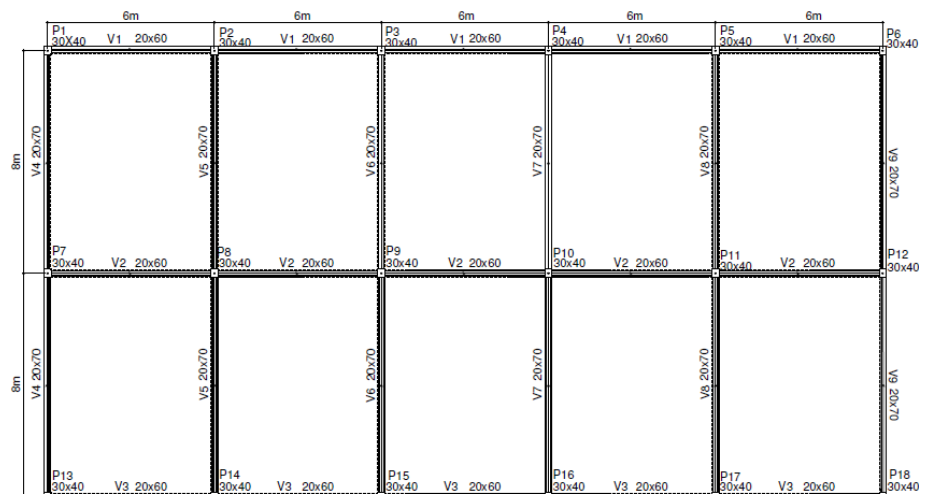
Os resultados das análises de segunda ordem obtidos pelo coeficiente Gama-z foram comparados aos obtidos pelo processo P-Delta.

Avaliou-se também a eficiência dos esforços de segunda ordem obtidos pela majoração dos esforços horizontais de primeira ordem por  $0,95 \times \text{Gama-z}$ .

## 2.1 PLANTAS DOS MODELOS ANALISADOS

Planta baixa dos pavimentos, térreo e tipo (a mesma para os três modelos), conforme Figura 1.

Figura 1 – Planta baixa dos Modelos I, II e III.



Fonte: Autores

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para análise estrutural dos modelos apresentados, foi suposta a estrutura constituída por nós fixos na ligação pilar-viga, concreto com resistência de 40 MPa e aço CA50. A estrutura foi submetida a uma carga horizontal, devido à ação do vento, com uma velocidade de 30 m/s (para a região do município de Natal/RN), incidindo sobre a fachada “B” dos modelos, em uma região com terreno levemente acidentado.

A partir destas premissas, foram inicialmente calculadas as forças horizontais na edificação, geradas pela ação do vento, conforme os parâmetros da ABNT NBR 6123 (1988). Esse carregamento, devida ao vento, foi majorado de acordo com as combinações ações das hipóteses 1 e 2:

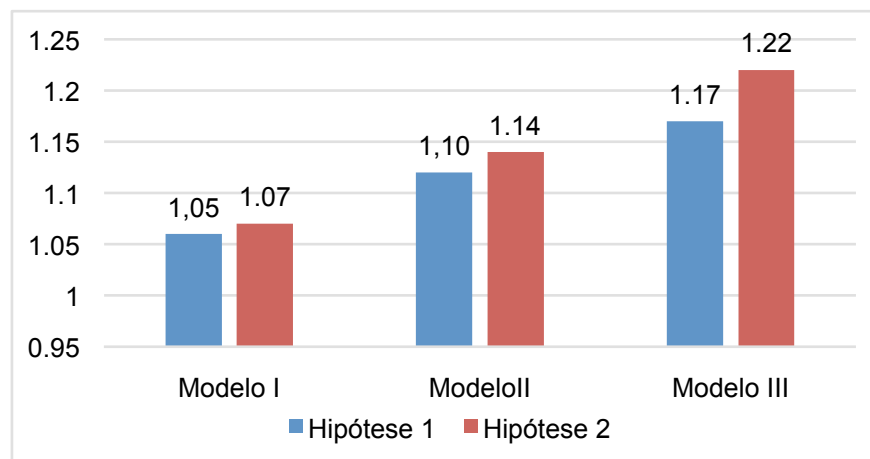
Para os cálculos dos carregamentos verticais, gerados pelas cargas permanentes e acidentais, foram utilizados os parâmetros definidos na ABNT NBR 6120 (1980), e majorados de acordo com combinações de ações das hipóteses 1 e 2.

Os valores dos deslocamentos dos pórticos planos, devido às ações das forças horizontais combinadas, foram obtidos com auxílio do programa FTOOL.

A não linearidade física foi considerada de forma aproximada em função da redução da rigidez dos elementos estruturais. Devido a composição das estruturas por vigas e pilares, adotou-se um valor único da rigidez, de acordo com a expressão:  $(EI)_{sec} = 0,7 \times E_{ci} I_c$ .

As avaliações do coeficiente Gama-z, para as hipóteses 1 e 2, dos modelos I, II e III, foram realizadas de acordo com a ABNT NBR 6118 (2014) e os resultados destacados no Gráfico 1.

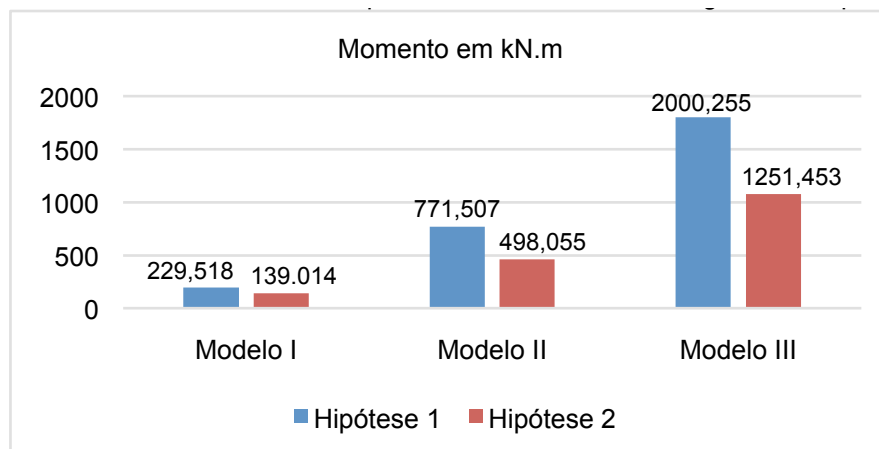
**Gráfico 1 – Valores de Gama-z e em função das combinações de ações das hipóteses 1 e 2.**



Fonte: Autores

O Gráfico 2 apresenta os valores dos momentos de primeira ordem (momento na base da estrutura) sem majoração (Gama-z menor que 1,1) para o Modelo I, segundo as hipóteses 1 e 2 e para o Modelo II na hipótese 1. Ele também apresenta os momentos majorados por  $0,95 \times \text{Gama-z}$  para os modelos II e III, na hipótese 2 e Modelo III na hipótese 1. Na avaliação deste gráfico verificou-se que a combinação de ação mais crítica foi a da hipótese 1 (hipótese que tem o vento como ação principal). Esta hipótese foi a que apresentou os maiores momentos.

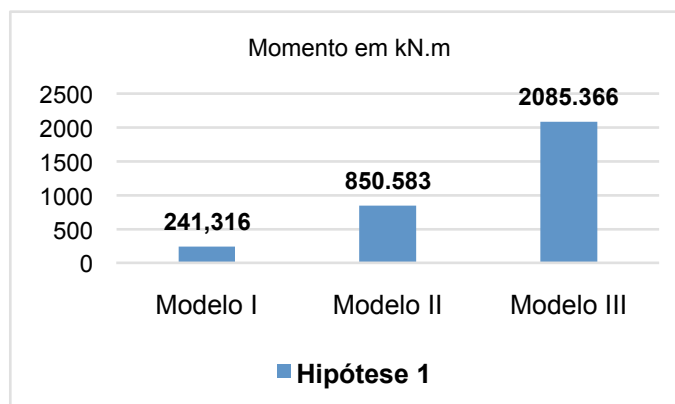
Gráfico 2 – Momentos Finais para os Modelos I, II e III, segundo as hipóteses 1 e 2.



Fonte: Autores

Na continuidade do estudo, foram calculados os efeitos de segunda ordem pelo processo P-Delta, para os Modelos I, II e III, para a combinação de ações mais crítica, hipótese 1, cujo resultados estão elencados no Gráfico 3.

Gráfico 3 – Valores do P-Delta, em função das combinações de ações da hipótese 2.



Fonte: Autores

Na comparação entre os resultados obtidos do coeficiente Gama-z e do processo P-Delta, referentes aos modelos I, II e III, da hipótese 1, observou-se que o momento obtido na base da estrutura, majorado por  $0,95 \times \text{Gama-z}$ , ficou em torno de cinco por cento do calculado pelo processo P-Delta, conforme a tabela 1.

**Tabela 1 – Comparação entre Gama –z e o processo P-Delta (Hipótese 1)**  
**M1,tot,d - majorado com o valor de 0,95xGama-z.**

Modelo	Gama-z			P- Delta	Diferença (%)
	M1, tot,d (kn.m)	Coef. Gama-z	M1,tot,d Majorado (kN.m)	Momento final (kn.m)	
I	229,518	1,05	228,944	241,316	5,1
II	771,507	1,10	806,225	850,583	5,2
III	1799,6	1,17	2000,255	2085,366	4,1

Fonte: Autores.

Fruto do resultado da tabela 1, constatou-se, que quando se adota o valor integral de Gama-z, como coeficiente de majoração, os esforços de segunda ordem praticamente coincidem com os relativos ao processo P-Delta, conforme se verifica na tabela 2.

**Tabela 2 – Comparação entre Gama –z e o processo P-Delta (Hipótese 2)**  
**M1,tot,d majorado com o valor inteiro de Gama-z**

Modelo	Gama-z			P- Delta	Diferença (%)
	M1, tot,d (kn.m)	Coef. Gama-z	M1,tot,d Majorado (kN.m)	Momento final (kn.m)	
I	229,518	1,05	240,994	241,316	0,13
II	771,507	1,10	848,658	850,583	0,23
III	1799,6	1,17	2105,532	2085,366	0,97

Fonte: Autores.

No presente trabalho constataram-se algumas vantagens e desvantagens da aplicação do coeficiente Gama-z e do Processo P-Delta que estão elencadas na tabela 3.

**Tabela 3 – Vantagens e desvantagens do coeficiente Gama-z e do processo P-Delta**

Parâmetro	Vantagem	Desvantagem
Gama-z	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Considera a deformação causada pela ação horizontal atuante.</li> <li>- Resultados próximos da realidade.</li> <li>- Majorador de esforços, desde que seu valor seja menor que 1,3.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Limitado apenas a edifícios com mais de 4 pavimentos.</li> </ul>
P-Delta	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Resultados mais refinados;</li> <li>- É uma análise não linear geométrica;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Demanda um processo trabalhoso e, por vezes, desnecessário.</li> </ul>

Fonte: Autores.

Cabe destacar que além da verificação da estabilidade global da estrutura, pelo coeficiente Gama-z ou pelo processo P-Delta, os resultados dos deslocamentos horizontais calculados devem ser analisados e comparados com os valores limites, constantes da tabela 13.3, do item 13.3 da ABNT NBR 6118 (2014, p.77), conforme demonstrado na tabela 4.



Tabela 4 – Hipótese 1: deslocamentos horizontais

Modelo	H (m)	Deslocamentos Calculados (m)	Limite da norma (H/1700) (m)	Situação dos deslocamentos
I	15	0,0037	0,0088	OK
II	27	0,014	0,0159	OK
III	39	0,036	0,0229	Excessivo

Fonte: Autores.

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos estudos realizados no presente artigo, pode-se concluir que o coeficiente Gama-z possibilita a classificação da estrutura como de nós fixos ou de nós móveis, além de permitir estimar os esforços de segunda ordem, para Gama-z compreendido entre 1,10 e 1,30. Além dessa faixa os efeitos de segunda ordem tomam proporções exageradas, comprometendo a estabilidade da estrutura, a capacidade portante dos elementos estruturais componentes e a economia. Por sua vez, o processo P-Delta, que leva em conta a análise não linear, possibilitou estimar com mais precisão os efeitos globais de segunda ordem (momento na base da estrutura).

Neste contexto, fruto da avaliação numérica realizada neste trabalho, pode-se verificar que o valor do coeficiente Gama-z aumenta conforme se aumenta a altura da estrutura e também que a combinação de ações considerada crítica foi da hipótese 1 (vento como ação principal), a hipótese que gerou os maiores momentos finais.

Da comparação entre os resultados obtidos pelo Gama-z e pelo P-Delta, constatou-se uma diferença em torno de cinco por cento. Verificou-se, também, que se o fator de majoração dos esforços de primeira ordem, para valores de Gama-z situado entre 1,10 e 1,30, fosse correspondente ao valor inteiro do Gama-z, em vez de noventa e cinco por cento, o valor final ficaria praticamente igual ao alcançado pelo processo iterativo P-Delta.

Cabe destacar que o coeficiente Gama-z e o processo P-Delta são ferramentas de importância na análise da estabilidade global dos edifícios de concreto armado, entretanto não se pode deixar de realizar a verificação do deslocamento máximo no topo da estrutura, conforme a ANBT NBR 6118 (2014).

Por fim, sugerimos para a continuidade deste estudo os seguintes trabalhos futuros:

- estudar como a variação na inércia de pilares ao longo da altura alteram os parâmetros de instabilidade;
- estudar o Gama-z, considerando diferentes valores para redução de rigidez para vigas e pilares.

## REFERÊNCIAS

ANDRADE NETO, Ivo Carrijo. **Contribuição à Análise da Estabilidade Global em Edifícios de Concreto Armado com Redução Brusca de Rigidez entre Pavimentos**. 2013. 134 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Brasília, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2014. 5p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações – Procedimento. Rio de Janeiro, 1988. 66p.

BUENO, M. M. E. **Avaliação dos parâmetros de instabilidade global em estruturas de concreto armado**. 2009. 88f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

HAUCH, Anderson da Silva. **Análise da estabilidade global de estruturas de concreto armado**. 2010. 75f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2010.

LIMA, J. S. (2001). **Verificações da punção e da estabilidade global de edifícios de concreto**: desenvolvimento e aplicação de recomendações normativas. 225p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

LINS, Fernando de Farias Vecchio. **Contribuição à avaliação da estabilidade global e pré-dimensionamento de pórticos planos em concreto pré-moldado**. 2013. 250f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

LOPES, A. P.; SANTOS, G. O.; SOUZA, A. L. A. C. Estudo sobre diferentes métodos de análise p-delta. **Revista Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Rio Grande, RS. v. 5, n. 7, 2005. p.1.

MARIN, Marcelo Cuadrado. **Contribuição à análise da estabilidade global de estruturas em concreto pré-moldado de múltiplos pavimentos**. 2009, 215f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de estruturas) – Universidade de São Paulo, 2009.

MONCAYO, W. J. Z. **Análise de segunda ordem global em edifícios com estrutura de concreto armado**. 2011. 221f. Dissertação (Mestrado em Ciências, Programa de Engenharia Civil - Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

SANTURIAN, S. **Não linearidade geométrica em pórticos planos de concreto armado**. 2008. 75f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2008.

