



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

Análise de uma Edificação Considerando Desvios Construtivos Reais

Fabiana Guedes de Oliveira Rocha¹, Sérgio Hampshire de C. Santos²

¹Doutoranda, COPPE/ UFRJ / fabiana.guedes@poli.ufrj.br

²UFRJ / Departamento de Estruturas / sergiohampshire@poli.ufrj.br

Resumo

As construções em concreto armado são intrinsecamente imperfeitas, o que indica que desvios construtivos devem ser considerados nos projetos das estruturas. Devido à sua importância, o eventual desaprumo dos pilares com a vertical deve ser explicitamente levado em consideração. Devido à dificuldade de se medir estes desvios, existem relativamente poucos trabalhos acadêmicos relacionados a este tema. Entretanto, por se tratar de um efeito de grande importância para a segurança, normas de projeto de estruturas de concreto, como a NBR 6118 e o EUROCODE 2, buscam considerar previamente, na etapa de projeto, possíveis desvios na linearidade e alinhamento dos pilares que possam ocorrer durante a construção. Este trabalho tem como objetivo verificar a segurança de uma edificação em que foi constatado e medido um importante desvio construtivo real. É também apresentada uma metodologia de verificação para outras edificações em que forem constatados desvios construtivos semelhantes. Busca-se assim contribuir para os estudos dos desvios construtivos, incluindo uma comparação entre os diversos métodos de análise dos efeitos locais de segunda ordem em pilares prescritos pelas normas, através de um exemplo real.

Palavras-chave

Desvios Construtivos, Pilares, Efeitos Locais de Segunda Ordem

Introdução

Medir desvios construtivos em construções em concreto armado é uma tarefa difícil, pois requer o uso de equipamentos topográficos de alta precisão. Assim, existem poucos trabalhos acadêmicos relacionados a esse tema. Entretanto, trata-se de um tema de grande importância para a segurança e por esta razão as normas, que prescrevem os requisitos básicos para os projetos de estruturas de concreto, buscam considerar previamente, na etapa de dimensionamento, possíveis desvios na linearidade e alinhamento dos pilares que possam ocorrer durante a construção.

Na NBR 6118 (2014) essa consideração é realizada por meio de momentos mínimos. No EUROCODE 2 (2010) os momentos correspondentes a uma excentricidade mínima são somados aos momentos atuantes. O *Probabilistic Model Code* do *Joint Committee on Structural Safety* (JCSS, 2006), comitê internacional dedicado a estudar aspectos ligados à segurança estrutural por meio de métodos probabilísticos, em seu capítulo 3.11 (*Excentricities*), define dados para a consideração de excentricidades acidentais com uma abordagem probabilística.

O objetivo deste trabalho é verificar a segurança de uma edificação em que foi constatado e medido um importante desvio construtivo real, apresentando também uma rotina de cálculos



que pode ser aplicada a outras edificações em que forem constatados desvios construtivos semelhantes.

Faz-se a verificação da edificação com um modelo tridimensional utilizando-se o programa computacional SAP2000 (CSI, 2000), com a aplicação do desvio construtivo constatado no pilar.

A partir deste exemplo real pretende-se, também, comparar os métodos de análise locais dos efeitos de segunda ordem recomendados pela NBR 6118 (ABNT, 2014): Pilar Padrão com Curvatura Aproximada, Pilar Padrão com Rigidez Aproximada, Método Melhorado e Método Geral. Para obtenção das relações momento-curvatura utilizou-se o programa computacional MK-UFRJ, desenvolvido por CASTRO (2008).

Analisaram-se os casos de momentos mínimos e momentos de engastamento viga-pilar, com a armadura projetada e com um possível acréscimo de armadura.

A validação dos resultados para os três primeiros métodos foi feita com o programa computacional P-CALC desenvolvido por CARDOSO e KIMURA (2013). Para o Método Geral foi especificamente desenvolvida uma planilha em MATHCAD para sistematizar sua aplicação.

Ao final é realizada a verificação de estabilidade da edificação utilizando-se os valores das solicitações encontradas, e considerando-se o desvio construtivo. Essa verificação é realizada com o Módulo IV das planilhas FCO desenvolvidas por AVELINO (2012).

Este trabalho resume parte da Dissertação de Mestrado da primeira autora (ROCHA, 2015), orientada pelo segundo autor.

Métodos de avaliação dos efeitos locais de segunda ordem em pilares

A NBR 6118:2014 descreve um Método Geral e três Métodos Aproximados, nos seus itens 15.8.3.2 e 15.8.3.3, respectivamente, que podem ser utilizados para a avaliação dos efeitos locais de segunda ordem em pilares. A Figura 3-6 ilustra a relação existente entre os métodos prescritos nessa norma e a classificação dos pilares, de acordo com seu índice de esbeltez.

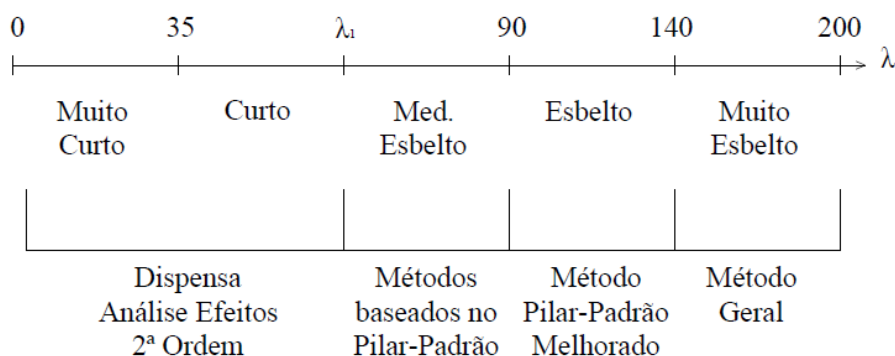


Figura 1 – Classificação dos pilares de acordo com o índice de esbeltez e os métodos de análise dos efeitos de segunda ordem.

Aspectos Técnicos do Projeto de Edifício em Estudo

A edificação em estudo tem quatro pisos projetados em lajes nervuradas, executados com formas plásticas, com nervuras espaçadas a cada 80 cm nas duas direções. A laje nervurada



tem altura total de 50 cm dos quais 10 cm representam a capa de concreto e os outros 40 cm são preenchidos somente na região das nervuras.

A altura total da edificação é de 18,90 m com o pé direito estrutural, entre as lajes nervuradas, de 4,90 m e a distância do piso ao teto é de 4,40 m. As fundações foram feitas em estacas escavadas do tipo hélice contínua.

Sobre os pilares existem faixas maciças de concreto com dimensões de 90 cm x 50 cm na direção transversal, e de 60 cm x 50 cm na direção longitudinal. Buscando-se dar flexibilidade ao “layout” de utilização, a estrutura em concreto armado foi concebida com vãos livres de aproximadamente 7,50 m e 10,45 m.

A faixa central do edifício e as extremidades foram projetadas em estrutura convencional com lajes maciças de 10 cm de espessura de concreto armado, que se apoiam sobre vigas que, por sua vez apoiam-se nos pilares.

Os pilares têm dimensões de 40 cm x 60 cm, exceto nas extremidades em que as dimensões variam entre 20 cm x 60 cm e 20 cm x 80 cm.

As Figuras 1 e 2 mostram, respectivamente, a planta esquemática da seção de interesse da edificação e o corte AA.

Os carregamentos adotados para a edificação, em conformidade com a NBR 6120 (ABNT, 1980) foram cargas permanentes incluindo-se 1,0 kN/m² de revestimento e 2,0 kN/m² referente a paredes e/ou divisórias a serem construídas e/ou modificadas, de acordo com o “layout” de utilização, e cargas acidentais de 3,0 kN/m² em todas as lajes.

Quanto a resistência à compressão do concreto foi previsto em projeto concreto de 40 MPa para toda a superestrutura.

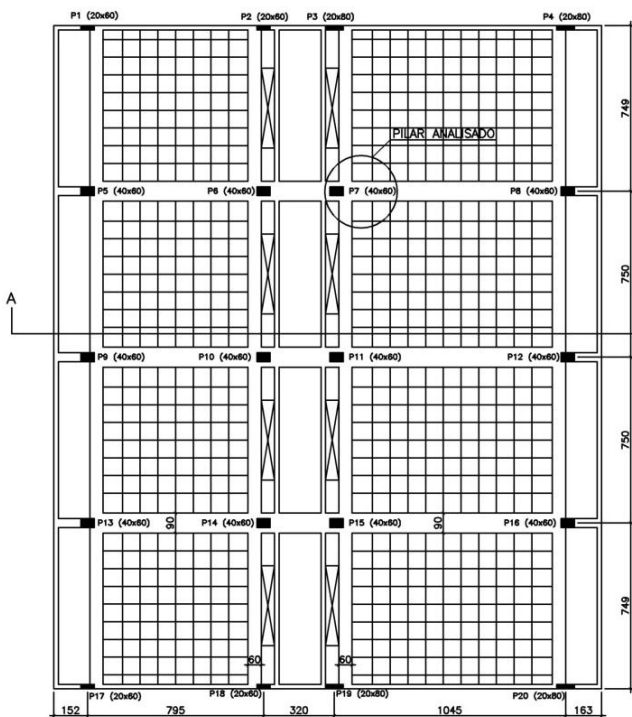


Figura 1 – Planta baixa esquemática da edificação em estudo.

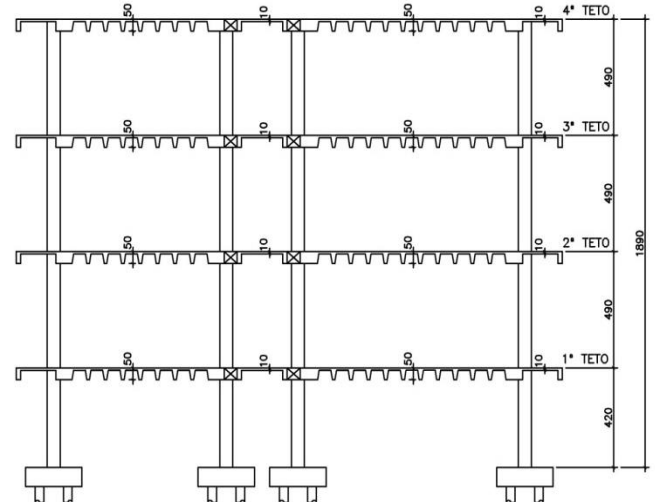


Figura 2 – Corte esquemático AA da edificação em estudo.

O Pilar P7

Em qualquer processo produtivo podem ocorrer desvios construtivos, que podem alterar geometricamente os elementos fabricados.

Durante a execução da estrutura em estudo foi constatado um desvio construtivo de 6 cm no pilar P7 da edificação (ver Figura 1). O desvio ocorreu na base do pilar entre dois pisos de laje nervurada, conforme ilustram as Figuras 3 e 4.

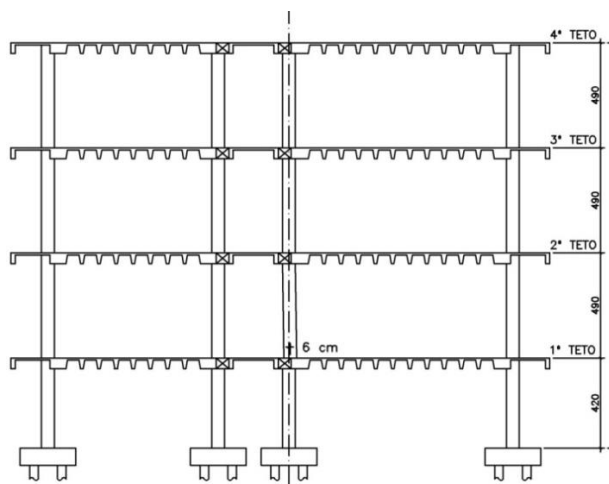


Figura 3 – Figura esquemática do desvio ocorrido.



Figura 4 – Foto do pilar em estudo sem o revestimento.

Modelagem da Edificação

Para estudar os efeitos do desvio construtivo do pilar no comportamento da edificação, foram desenvolvidos dois modelos: o primeiro considerando-se a inexistência de desvio construtivo no pilar P7 (1º caso) e o segundo com a consideração do desvio construtivo constatado na base do pilar P7 (2º caso). A análise estrutural foi desenvolvida utilizando-se o programa computacional SAP2000 (CSI, 2010).

As fundações da edificação foram modeladas com apoios de segundo gênero, com restrição de translação nas direções x e y . Os eixos adotados para a modelagem estão apresentados na Figura 6.

O edifício foi analisado com um modelo em elementos finitos, aplicando o programa de análise estrutural SAP2000 (CSI, 2010). No modelo estrutural foram utilizados elementos de barra (“frames”) para representar os pilares e as faixas. As lajes foram modeladas como placas (“shell”) sendo as lajes maciças com altura de 10 cm e as nervuradas com espessura média de 22 cm. O eixo das vigas foi modelado coincidindo com o plano médio das lajes e os pilares foram considerados bi rotulados (Figura 5).

O concreto da edificação tem resistência característica $f_{ck} = 40$ MPa, coeficiente de Poisson $\nu = 0,2$, módulo de elasticidade secante igual a 32 GPa e coeficiente de dilatação térmica igual a $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$. O projeto de estrutural do pilar P7 determinou 12 barras de 16 mm, com cobrimento de 3 cm.

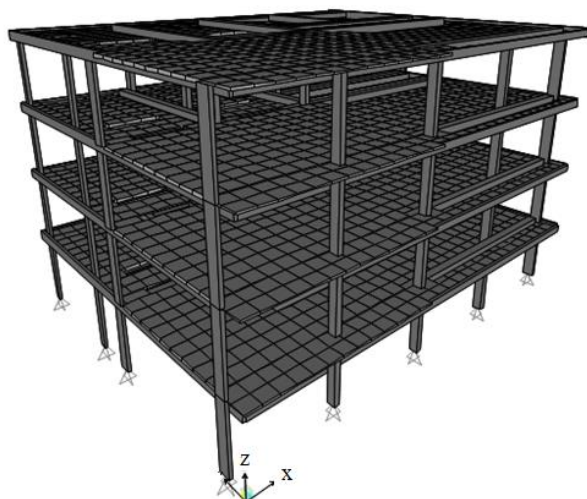


Figura 5 – Modelo tridimensional da edificação.

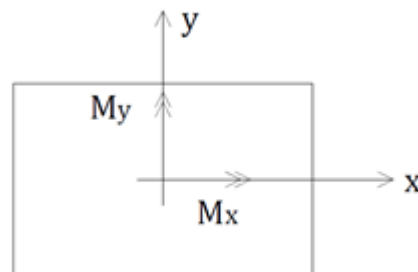


Figura 6 – Eixos adotados na modelagem

Resultados da Análise Estrutural

Aplicando-se ao modelo estrutural, nos dois casos analisados, as mesmas combinações de carregamentos previstas em projeto, as solicitações locais mais desfavoráveis obtidas no pilar P7 estão mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados obtidos nos modelos da edificação em estudo.

Esforços	1º Caso		2º Caso	
	Pilar sem desvio		Pilar com desvio	
N_d (kN)	-3027,6		-2994,7	
$M_{sd,x}$ (kNm)	Topo	-25,1	-25,1	
	Base	27,6	27,9	
$M_{sd,y}$ (kNm)	Topo	434,4	468,2	
	Base	-461,8	-538,1	

Observa-se na Tabela 1 que o valor da força normal de compressão teve uma redução em torno de 1,1% devido a uma pequena perda de rigidez à qual o pilar foi submetido. O momento fletor M_y , onde foi constatado o desvio, teve um acréscimo de 16,6% na base e 7,8% no topo. Já o momento fletor M_x praticamente não teve variação, como previsto.

Resultados das Verificações dos Efeitos Locais de Segunda Ordem no Pilar P7

Em uma primeira análise foi realizada a verificação dos efeitos locais de segunda ordem no pilar P7 para os momentos mínimos de primeira ordem previstos na NBR 6118 (2014). Observa-se nas duas primeiras colunas da Tabela 2 que entre o primeiro (Pilar Padrão com



Curvatura Aproximada) e o último (Geral) existe uma redução de 40,6 % para o momento em x e 28,0 % para o momento em y .

A segunda análise (caso “b”) considera as mesmas características do pilar P7 variando apenas a armadura para 12 barras de 20 mm. Observa-se nas duas últimas colunas da Tabela 2 que houve uma variação nos momentos finais nas duas direções.

Tabela 2 – Resultados obtidos na verificação da seção para os quatro métodos com momentos mínimos.

Métodos	Momentos Mínimos		Caso “b”	
	M_x (kNm)	M_y (kNm)	M_x (kNm)	M_y (kNm)
PP curvatura aproximada	172,6	160,5	–	–
PP rigidez aproximada	119,2	118,5	–	–
PP acoplado aos diagramas N, M e 1/r	108,9	115,7	104,5	112,5
Geral	102,5	115,5	98,8	110,1

O acréscimo de armadura no pilar P7, analisado no caso “b”, provoca um aumento de rigidez, principalmente na direção y , por se tratar da direção em que está distribuída a maior parte da armadura. Em uma seção mais rígida, os efeitos locais de segunda ordem são menos expressivos nos efeitos finais. Na Tabela 3 estão apresentados somente os momentos locais de segunda ordem.

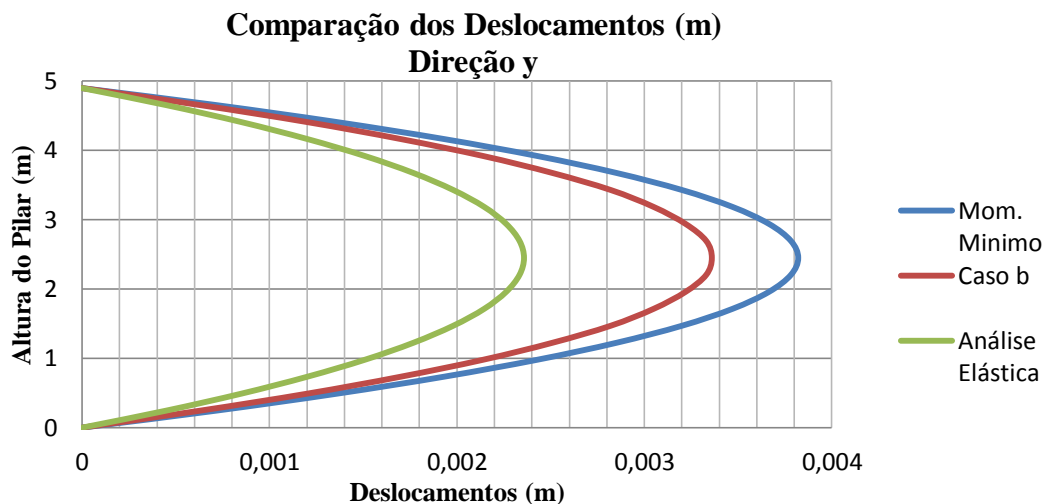
Tabela 3 – Verificação da seção para dois métodos de análise com momentos mínimos comparados ao caso “b”, considerando-se somente os efeitos locais de segunda ordem.

Métodos	Momentos de 2ª Ordem					
	Momentos Mínimos		Caso “b”		Diferença (%)	
	M_x (kNm)	M_y (kNm)	M_x (kNm)	M_y (kNm)	M_x	M_y
PP acoplado aos diagramas N, M e 1/r	27,2	15,8	22,8	12,6	-16,2%	-20,3%
Geral	20,8	15,6	17,1	10,2	-17,8%	-34,6%

Observa-se que realmente, em uma seção mais rígida, os momentos locais de segunda ordem são menores, apresentando uma redução máxima de 34,6% na direção y , quando calculado pelo Método Geral e 20,3% pelo Método do Pilar Padrão acoplado aos diagramas N, M e 1/r. O aumento de rigidez também provoca redução nos deslocamentos, principalmente na direção y conforme Figura 7 e Tabela 4.

Tabela 4 – Valores dos máximos deslocamentos obtidos pelo Método Geral, Figura 7.

Alt. Pilar (m)	Deslocamento (m)		
	A. Elástica	Mom. Mínimo	Caso “b”
2,45	0,002358	0,003821	0,003360



Em uma situação de projeto, se fosse analisado o aumento da taxa de armadura do pilar de 24 cm² (12 barras de 16 mm) para 37,7 cm² (12 barras de 20 mm, caso “b”), buscando-se a redução dos efeitos de segunda ordem e essa análise fosse realizada pelo Método do Pilar Padrão acoplado aos diagramas N, M e 1/r, a conclusão seria de que haveria uma redução de 20,3% nesses efeitos. Entretanto, se a mesma análise fosse realizada pelo Método Geral a redução seria de 34,6%.

Outra situação analisada foi o cálculo dos efeitos de segunda ordem somados aos momentos de primeira ordem do engastamento viga-pilar obtidos no modelo estrutural feitos no programa SAP 2000 (CSI, 2000). Foram obtidos os resultados de momentos fletores nas direções *x* e *y* para o 1º caso, sem a consideração do desvio construtivo, e na direção *y* com a consideração do desvio, 2º caso. Os resultados da verificação para os momentos de engastamento viga-pilar do 1º caso e 2º caso encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados obtidos na verificação da seção para os diversos métodos com os momentos de engastamento do 1º Caso.

Métodos	1º Caso		2º Caso
	Mx (kNm)	My (kNm)	My (kNm)
PP curvatura aproximada	101,9	245,3	275,1
PP rigidez aproximada	19,5	212,7	245,6
PP acoplado aos diagramas N, M e 1/r	14,7	213,9	249,2

Com o auxílio das planilhas elaboradas em MATHCAD foram determinados, pelo Método Geral, os valores de momentos e deslocamentos ao longo da altura do pilar, na direção *y* em que ocorreu o desvio construtivo. Tais resultados são apresentados na Tabela 6, onde também são comparados os valores de momentos e deslocamentos.

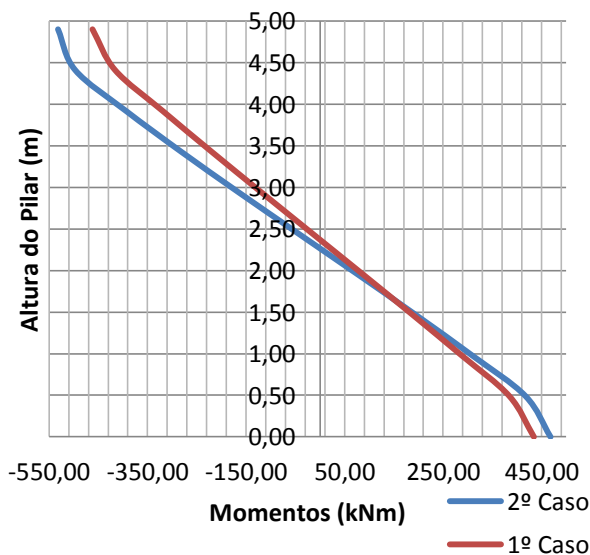


Tabela 6 – Comparação dos momentos ao longo da altura do pilar obtidos pelo Método Geral, Direção y.

Alt. Pilar (m)	Comparação dos Momentos (kNm)			Comparação dos Deslocamentos (m)		
	1º Caso	2º Caso	Variação (%)	1º Caso	2º Caso	Variação (%)
0,00	434,40	468,20	7,78%	0,000000	0,000000	0,0%
0,49	384,61	417,40	8,52%	0,001550	0,003411	120,1%
0,98	287,48	308,81	7,42%	0,001935	0,003551	83,5%
1,47	187,64	193,78	3,28%	0,001516	0,001810	19,4%
1,96	85,99	75,04	-12,74%	0,000570	-0,001000	75,3%
2,45	-16,50	-45,30	174,52%	-0,000614	-0,004221	587,9%
2,94	-118,90	-165,07	38,83%	-0,001753	-0,007194	310,4%
3,43	-220,25	-282,09	28,08%	-0,002560	-0,009251	261,4%
3,92	-319,60	-394,08	23,30%	-0,002751	-0,009671	251,5%
4,41	-415,97	-496,93	19,46%	-0,002036	-0,007157	251,5%
4,90	-461,80	-531,80	15,16%	0,000000	0,000000	0,0%

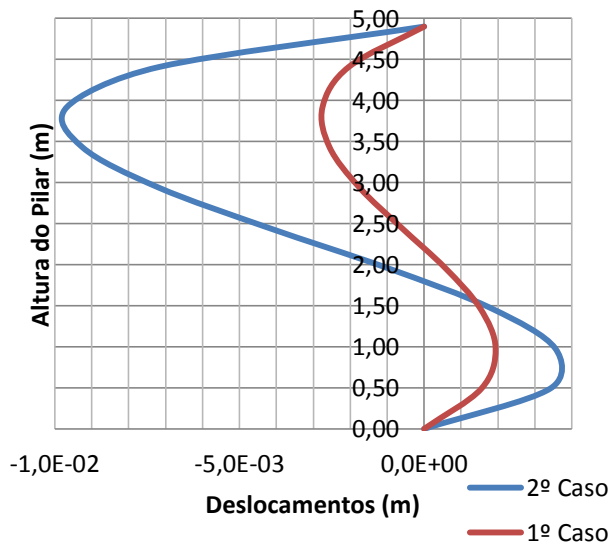
Com relação aos momentos, o desvio construtivo levou a um acréscimo máximo de 174,52% no valor do momento e 587,9% nos deslocamentos finais do pilar P7 a meia altura do pilar P7 (h=2,45m).

**Comparação dos Momentos (kNm)
Direção y**



**Figura 8 – Comparação dos momentos,
direção y.**

**Comparação dos Deslocamentos (m)
Direção y**



**Figura 9 – Comparação dos
deslocamentos, direção y.**

A NBR 6118:2014 estabelece que as condições analíticas de segurança são verificadas quando as resistências de cálculo são maiores que as solicitações de cálculo. As solicitações finais mais críticas são os momentos máximos solicitantes do 2º caso, na base do pilar P7,



com a armadura de projeto: 12 barras de 16 mm. A Figura 10 mostra o resultado obtido da verificação da seção, atendendo às condições normativas de segurança..

Resultados:

☑ Resultados - Verificação

- Fator Global de Segurança: $\lambda = 1.015$

- Esforços obtidos:

- Solicitantes:

$M_{xSd} = 27.6$ (kNm)

$M_{ySd} = 538$ (kNm)

$N_{Sd} = -2.994 \times 10^3$ (kN)

- Resistentes:

$M_{xRd} = 28.007$ (kNm)

$M_{yRd} = 545.941$ (kNm)

$N_{Rd} = -3.038 \times 10^3$ (kN)

- Detalhes do processo:

- Valores finais:

- Inclinação da Linha Neutra: $\alpha = 82.783$ (graus)

- Domínio do ELU: DELU = "Domínios 3 e 4 - Flexão simples / composta"

- Parâmetro de deformação correspondente: $D = -11.032$

- Deformação na fibra superior: $\epsilon_s = 1.935$ (por mil)

- Deformação na fibra inferior: $\epsilon_i = -3.5$ (por mil)

Figura 10 – Verificação à flexão oblíqua do pilar com os máximos momentos.

Conclusões

Com base nos resultados obtidos da verificação à flexão oblíqua do pilar conclui-se que a segurança estrutural da edificação, com relação aos efeitos locais no pilar, não foi comprometida pelo desvio construtivo constatado.

Os métodos aproximados aplicados ao estudo de caso levaram a soluções conservadoras, no que se refere à segurança. Entretanto, como pode ser visto no trabalho de REGALLA (2015), em que foi feito um estudo paramétrico comparando os métodos de análise dos efeitos locais de segunda ordem previstos na NBR 6118:2014, observa-se que, dependendo do índice de esbeltez do pilar, os métodos aproximados podem conduzir a soluções não seguras.

Portanto, com o aumento da disponibilidade de recursos computacionais, não existe atualmente nenhuma restrição a que se aplique correntemente o Método Geral ao dimensionamento de todos os pilares de uma edificação. Isto, visto que o Método Geral conduz a resultados mais precisos e a soluções mais econômicas.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 6118, Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro. 1980.



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

- AVELINO, V. S. L., Flexão Composta Oblíqua: Superfície de Resistência, Curvas de Iteração, Verificação e Dimensionamento de Seção Qualquer. Trabalho Final de Graduação, DME/POLI/FRJ, Rio de Janeiro, 2012.
- CARDOSO, S. D. Jr.; KIMURA, A. E. Sistema computacional para análise não linear de pilares de concreto armado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 55, Gramado, RS, 2013.
- CASTRO, F. M. O., Análise plástica de pórticos de concreto armado submetidos a ações sísmicas segundo critérios de ductilidade. Trabalho Final de Graduação, DME/POLI/FRJ, Rio de Janeiro, 2008.
- CSI COMPUTERS & STRUCTURES, INC., SAP2000, Integrated Software for Structural Analysis & Design, Version 14. CSI Inc, Berkeley, California, USA, 2010.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, EN 1998-1:2010 – Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1: General rules and rules for buildings, London, BSI, 1998.
- JOINT COMMITTEE ON STRUCTURAL SAFETY (JCSS). The Probabilistic Model Code. ETHZ, Zurique. Disponível em: <<http://www.jcss.byg.dtu.dk>>. 2006
- KIMURA, A. E., EE05 – Pilares, Notas de aula do curso de pós-graduação da Faculdade de Engenharia de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2010.
- MATHCAD, version 14.0.0.163, Parametric Technology Corporation, 140 Kendrick Street, Needham, MA 02494 USA.
- OBLÍQUA, versão 1.0, ZANDONÁ, C. A. W., DE OLIVEIRA, M. F. F., MARINO, , M. A., Universidade Federal do Paraná, Brasil, Março, 2001.
- REGALLA, D. A. P., Análise comparativa entre os diversos métodos de consideração dos efeitos locais de segunda ordem. Trabalho Final de Graduação, DES/POLI/FRJ, Rio de Janeiro, 2015.
- ROCHA, F. G. O. Verificação de uma Edificação Considerando Desvios Construtivos Reais / Fabiana Guedes de Oliveira Rocha, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Projeto de Estruturas, 2015.