

Estudo da influência de deslocamentos prescritos no pilar periférico de um pórtico para condição de apoio simples e engastado

Thiago Cunha da Silva (Universidade Federal Fluminense) E-mail: thiagocunha0307@gmail.com

Resumo: Este artigo estuda os efeitos de deslocamentos prescritos em um pórtico de três pavimentos para as condições de apoio simples e engastado, além de realizar uma breve análise sobre os aspectos da interação solo-estrutura. O estudo consiste em, para um mesmo pórtico, aplicar deslocamentos prescritos no sentido negativo do eixo em um dos pilares extremos e comparar os resultados obtidos para a condição de apoio simples e engastado. Foi observado que com o aumento do recalque no pilar extremo ocorre a redistribuição das solicitações amplificando de maneira significativa a compressão do pilar interno, além do incremento expressivo do momento negativo do apoio central das vigas do pórtico. Os resultados obtidos neste estudo estão de acordo com os observados em outros autores.

Palavras-chave: Recalque, pórtico, interação solo-estrutura, modelo estrutural.

Study of the influence of prescribed displacements on the peripheral pillar of a frame for simple and fixed support condition

Abstract: This paper studies the effects of prescribed displacements on a three-story frame for simple and fixed support conditions, as well as conducting a brief analysis of the aspects of soil-structure interaction. The study consists of applying, for the same frame, prescribed displacements in the negative direction of the axis in one of the extreme pillars and comparing the results obtained for the simple and fixed support condition. It was observed that with the increase of the settlement in the extreme pillar the redistribution of the requests occurs, amplifying in a significant way the compression of the internal pillar, besides the expressive increase of the negative moment of the central support of the beams of the frame. The results obtained in this study are in agreement with those observed by other authors.

Keywords: settlement, frame, soil-structure interaction, structural model.

1. Introdução

Recalques ocorrem inevitavelmente em todo tipo de estrutura, independente do grau de complexidade de seu sistema. O estudo da interação solo-estrutura é essencial para o bom dimensionamento e avaliação do comportamento estrutural, pois busca analisar os efeitos da redistribuição de esforços em função dos deslocamentos que ocorrem no solo, obtendo, portanto, o comportamento mais próximo da realidade

Existem diversas patologias observadas em edificações em virtude da não previsão ou da previsão inexata dos recalques, levando a um comportamento estrutural inadequado. Cavalcanti, et al (2016) Observou o surgimento de diversas fissuras em edifícios na região metropolitana de Recife que ocasionaram inúmeras patologias, além de desaprumo da edificação. Pavan, et al (2014) alerta sobre as possíveis patologias que podem surgir tais como fissuras em vigas, lajes e até mesmo esmagamento de pilares.

Entretanto, ainda é difícil de se estimar de forma exata os recalques previstos nas fundações, muitas vezes os recalques previstos são demasiadamente superiores aos medidos, conforme observado em Danziger, et al (2005), que inclusive sugeriu fatores corretivos para os módulos de compressibilidade dos solos.

No estudo da interação solo-estrutura a obtenção dos recalques são necessários para se

determinar os coeficientes de mola do modelo estrutural, a falta de exatidão na determinação dos recalques gera, conseqüentemente, menor precisão na resposta do modelo estrutural.

2. Aspectos sobre a rigidez da estrutura na interação com o solo

Para idealizar a interação entre o solo e a estrutura utiliza-se o conceito de coeficiente de mola, onde as molas representam a capacidade de haver deslocamentos nos apoios. Os coeficientes são determinados em função do tipo de solo e da solicitação a qual a estrutura está submetida. O processo para se determinar os coeficientes de mola da estrutura é iterativo e pode ser observado em Chamecki, apud Pavan, et al (2014).

Mota, M (2009) ressalta a relevância da flexibilidade da fundação nos esforços da superestrutura, relatando que em edifícios com sistema estrutural laje-cogumelo (menos rígido) mostram-se mais sensíveis a fundações flexíveis em comparação a sistemas estruturais mais rígidos como sistema laje, pilar e viga. Iwamoto, apud Mota, M (2009) verificou que a rigidez da estrutura contribui para reduzir os recalques diferenciais e distorcionais e deduziu que os esforços provenientes da interação solo-estrutura são maiores nos pavimentos inferiores, contudo, a depender da rigidez relativa da estrutura-solo podem ter influência nos pavimentos superiores.

Um ponto importante para a modelagem da estrutura são os tipos de apoio adotados para representar as fundações. Usualmente são utilizados apoios simples (segundo gênero) quando se pretende caracterizar o uso de fundações superficiais, esse uso se deve em virtude da maior suscetibilidade da fundação superficial de apresentar recalques distorcionais, o qual pode ser caracterizado pela rotação que ocorre em seu apoio. Apoios engastados são utilizados quando se pretende caracterizar o uso de fundações profundas, esse uso se deve em virtude da maior rigidez que as fundações profundas possuem, sendo assim, o modelo estrutural que melhor se adequa a realidade da estrutura.

Salienta-se que embora sejam utilizados os preceitos do parágrafo anterior para definir o tipo de apoio para determinado tipo de fundação, deve-se avaliar se a fundação dimensionada possui rigidez ou flexibilidade suficiente para caracterizar o tipo de apoio estimado. Neste ponto deve-se levar em consideração as características do solo e do tipo de fundação adotada. Não necessariamente uma sapata se comportará como apoio flexível ou uma fundação profunda como apoio rígido, ressalta-se que, além dos preceitos básicos de dimensionamento estrutural, deve-se levar em consideração no projeto a condição de apoio adotada no modelo estrutural objetivando retratar o comportamento esperado no modelo.

Embora as fundações rasas possam ser consideradas apoios de 2º gênero, caso sejam demasiadamente rígidas podem ser caracterizadas como apoios rígidos. Uma forma de se avaliar o tipo de comportamento que a sapata pode ter é dada em função da tensão que ela transmite ao solo, conforme observado na obtenção dos coeficientes de mola em Pavan, et al (2014), quanto menor for a tensão transmitida ao solo mais próximo de um apoio rígido a fundação se aproxima.

Nas fundações profundas, apesar de não ser usual o dimensionamento de blocos flexíveis, especial atenção deve ser considerada para as condições do solo a fim de evitar estrangulamento das estacas e atrito negativo, que podem gerar certa flexibilidade no bloco e recalques indesejáveis.

Souza, et al (2008) enfatiza que o estudo da interação solo-estrutura possui grande importância na análise de casos em que a força normal concentrada em certos pilares ou em sapatas assentadas em solos estratificados. Acrescenta-se que há grande importância

nesse estudo quando houver suspeitas de haver bolsões de argila durante a sondagem ou da possibilidade de ocorrer atrito negativo em estacas.

Gusmão, apud Mota, M (2009) ressalta a influência da sequência construtiva em edificações que consideram a interação solo-estrutura. Foi observado que a medida que vai construindo os pavimentos subsequentes ocorre a tendência de uniformizar os recalques devido ao aumento da rigidez da estrutura, entretanto, este crescimento não é linear com o número de pavimentos.

Immich, et al (2016) destaca que além dos efeitos de redistribuição dos esforços na interação solo-estrutura, ocorre também o aumento do coeficiente γ_z quando atuam na edificação forças horizontais, podendo gerar a necessidade de se considerar os efeitos de segunda ordem.

Recomenda-se a leitura do livro Soil-Structure interaction, the real behaviour of structures (1989) onde estão reunidos diversos trabalhos sobre a interação solo-estrutura, é possível encontrar orientações sobre como proceder e quais variáveis considerar para diversos tipos de estruturas e solos. Diante da bibliografia consultada pôde-se verificar que o estudo da interação solo-estrutura está intimamente ligado à rigidez da estrutura e das solicitações às quais está submetida.

3. Estudo de caso

O estudo apresentado neste artigo consiste em analisar o efeito dos deslocamentos prescritos em um dos pilares extremos do pórtico utilizando condições de apoio diferentes para cada caso. Para a análise estrutural foi utilizado a ferramenta computacional Ftool, o software em questão foi escolhido por já ser consagrado na comunidade acadêmica.

São estudados dois pórticos de características iguais de carregamento, seção dos elementos estruturais, parâmetros de material e geometria. A diferença entre os pórticos consta nas condições de apoio, onde para um deles é adotado o apoio simples (segundo gênero) em todos os pilares e no outro apoio do tipo engastado (terceiro gênero).

Os pórticos em estudo estão sujeitos a um carregamento uniforme nas vigas de 12 kN/m , as vigas têm seção constante de $15 \times 40 \text{ cm}$, os pilares têm seção constante de $20 \times 20 \text{ cm}$ e o módulo de elasticidade do concreto é dado por $E = 30,67 \text{ GPa}$. A Figura 1 apresenta o modelo estrutural utilizado para os casos em estudo, onde é alterado somente o tipo de apoio em cada caso.

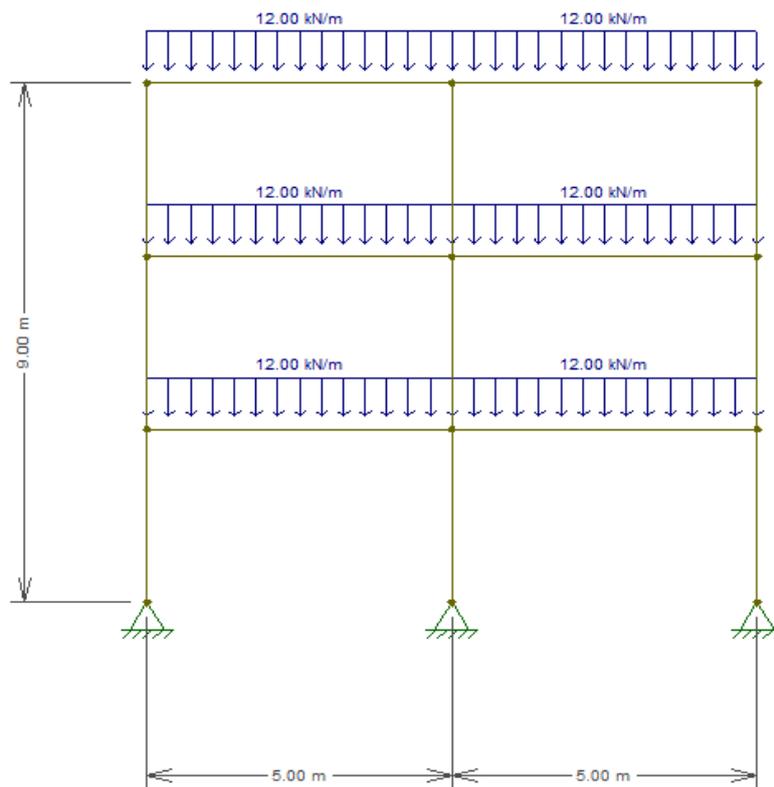


Figura 1 - Modelo estrutural, medidas em metros.

4. Pórtico com apoios simples

A Figura 2 apresenta o diagrama de momentos fletores para a condição de não haver deslocamentos prescritos.

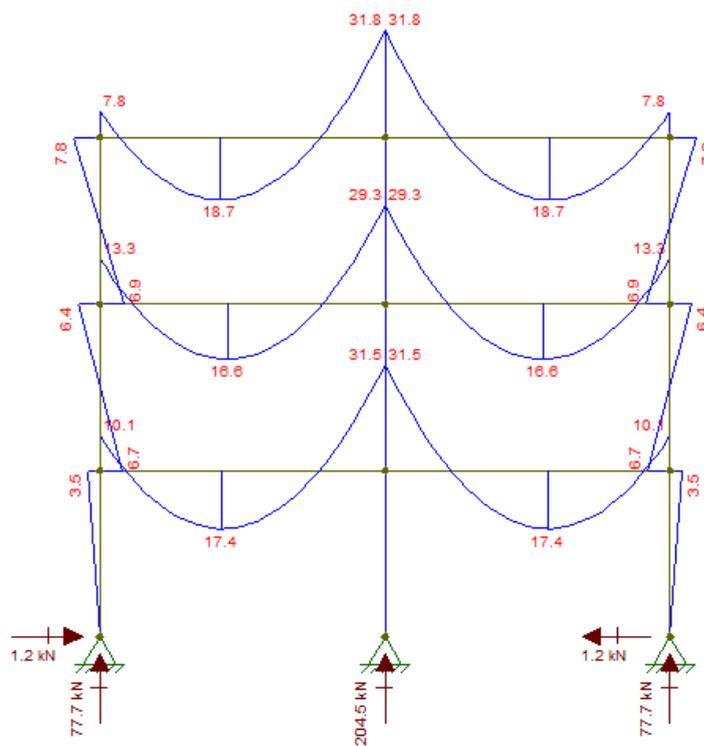


Figura 2 – Diagrama de momentos fletores para o pórtico (kN.m) e reações de apoio (kN).

Foi aplicado um deslocamento prescrito no pilar periférico direito (denominado P3) do pórtico variando de 5mm a 30 mm. O valor das reações de apoio na base e os momentos negativos do apoio central de cada viga constam na Tabela 1. Os momentos do apoio central são denominados em função do andar, sendo M1 para a 1º viga, M2 para a 2º viga e M3 para a 3º viga. As forças horizontais são denominadas de FH P1 para a força horizontal em P1 e assim em diante.

Tabela 1 – Variação do efeito do recalque em pórtico de base apoiada.

Condição de contorno do apoio	Reações (kN)			Momentos (kN.m)			Força horizontal (kN)		
	P1	P2	P3	M1	M2	M3	FH P1	FH P2	FH P3
Apoiado	77,7	204,5	77,7	31,8	29,3	31,5	1,2	0	-1,2
Recalque em P3 de 5mm	68,7	222,5	68,7	40,7	39,7	41,4	0,5	0	-0,5
Recalque em P3 de 10mm	59,7	240,6	59,7	49,5	50,1	51,2	-0,1	0	0,1
Recalque em P3 de 15mm	50,7	258,6	50,7	58,4	60,5	61,1	-0,7	0	0,7
Recalque em P3 de 20mm	41,7	276,6	41,7	67,3	70,9	70,9	-1,3	0	1,3
Recalque em P3 de 25mm	32,7	294,6	32,7	76,2	81,3	80,8	-2	0	2
Recalque em P3 de 30mm	23,7	312,6	23,7	85,1	91,7	90,6	-2,6	0	2,6

A fim de ilustrar os efeitos que o recalque ocasiona na estrutura apresenta-se na Figura 3 os resultados obtidos para o caso de recalque de 30 mm no pilar P3.

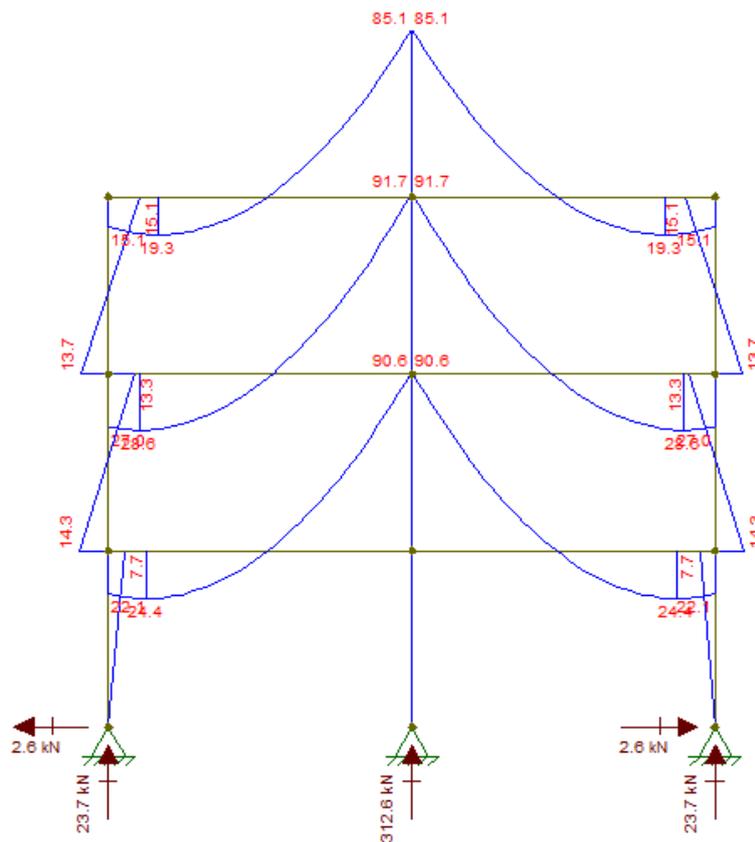


Figura 3 – Diagrama de momentos fletores para o pórtico submetido a um recalque de 30 mm no pilar extremo (kN.m).

Comparando os resultados obtidos na Figura 3 com os resultados da Figura 2 pode-se verificar a redistribuição dos momentos na viga, aumentando o momento negativo no apoio central e o momento positivo nos vãos da viga. Verifica-se também a alternância de solicitação de momento fletor nos pilares de cada andar, além do aumento superior a

50% de compressão no pilar interno.

O resultado observado está de acordo com obtido em Immich, et al (2016), que verificou um aumento expressivo na compressão nos pilares que não foram submetidos aos deslocamentos prescritos e uma redução da compressão dos pilares que foram submetidos.

5. Pórtico com apoios engastados

O pórtico a ser estudado neste item possui as mesmas características do anterior, alterando somente as condições de contorno dos apoios para engastado. A Figura 4 apresenta o diagrama de momentos fletores para a condição de não haver deslocamentos prescritos.

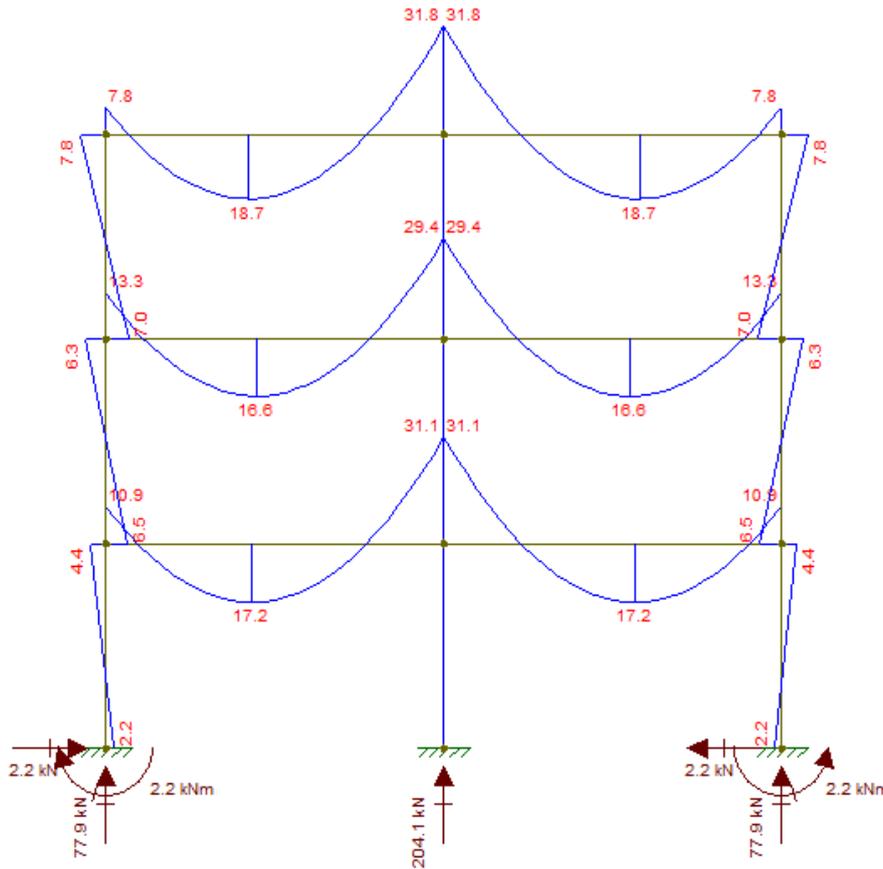


Figura 4 – Diagrama de momentos fletores para o pórtico (kN.m) e reações de apoio (kN) e momentos na base (kN.m).

De forma análoga ao item anterior foi aplicado um deslocamento prescrito no pilar extremo direito do pórtico variando de 5mm até 30 mm. A Tabela 2 apresenta o resumo dos resultados obtidos para cada caso estudado.

Tabela 2 – Variação do efeito do recalque em pórtico engastado.

Condição de contorno do apoio	Reações (kN)			Momentos (kN.m)			Força horizontal (kN)			Momento na base (kN.m)		
	P1	P2	P3	M1	M2	M3	FH P1	FH P2	FH P3	Mb P1	Mb P2	Mb P3
Engastado	77,9	204,1	77,9	31,8	29,4	31,1	2,2	0	-2,2	-2,2	0	2,2
Recalque em P3 de 5mm	69	222,4	68,6	40,7	39,7	40,8	1	0	-1	-0,4	0,6	1,7
Recalque em P3 de 10mm	60,1	240,6	59,3	49,5	50,1	50,5	-0,2	0,1	0,1	1,5	1,2	1,2
Recalque em P3 de 15mm	51,2	258,8	50	58,4	60,4	60,2	-1,4	0,1	1,3	3,4	1,9	0,7
Recalque em P3 de 20mm	42,2	277,1	40,7	67,3	70,8	69,8	-2,6	0,1	2,5	5,2	2,5	0,1
Recalque em P3 de 25mm	33,3	295,3	31,4	76,2	81,1	79,5	-3,8	0,2	3,6	7,1	3,1	-0,4
Recalque em P3 de 30mm	24,4	313,6	22	85,1	91,4	89,2	-5	0,2	4,8	9	3,7	-0,9

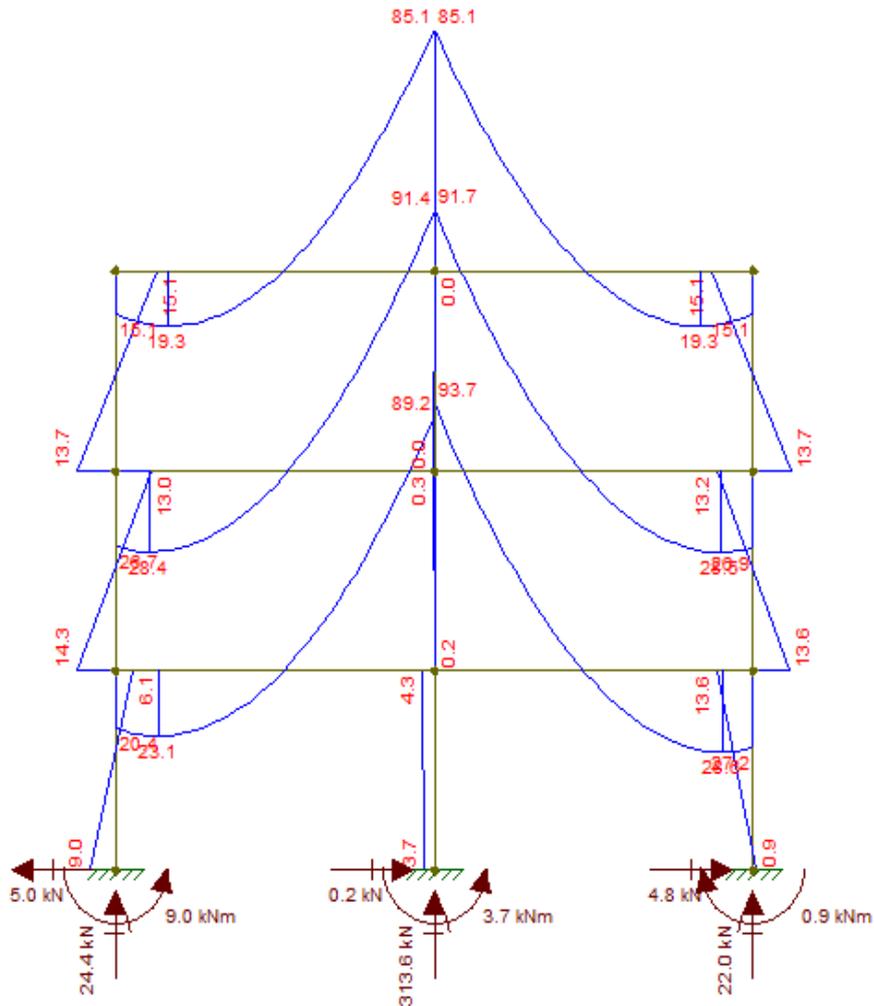


Figura 5 – Diagrama de momentos fletores para o pórtico submetido a um recalque de 30 mm no pilar extremo (kN.m).

Comparando os resultados obtidos na Figura 5 com os resultados da Figura 3 pode-se observar que a redistribuição de esforços que ocorrem nos pilares e no diagrama de momentos fletores das vigas são similares. Pode-se observar que, para este caso, há também a inversão da sollicitação de momentos fletores nos pilares de cada andar, havendo diferença relevante somente nos pilares da base.

6. Análise do comportamento do pórtico sob a ação de deslocamentos prescritos

Para ambas as condições de contorno adotadas o aumento do recalque na estrutura gerou a redistribuição dos esforços, aliviando a carga dos pilares periféricos e aumentando a carga no pilar interno, o efeito da redistribuição dos esforços foi observado em estudos de Rosa, et al (2012) e Danziger, et al (2005). Também foi observado nas vigas o aumento do momento positivo no vão e de forma mais expressiva o momento negativo no apoio central.

Verificou-se a alternância dos momentos nos pilares de cada andar, sendo na condição de apoio engastado, a magnitude do momento atuante foi mais elevada para o pilar periférico da base da fundação que não sofreu recalque. Observou-se também a alternância na direção da força horizontal na base, sendo no caso do apoio engastado de magnitude mais expressiva. Embora não tenha sido apresentado nas tabelas acima cabe ressaltar que os deslocamentos horizontais obtidos para o modelo estrutural de base apoiada foram superiores ao modelo estrutural de base engastada, em cerca de 20%, para todos os casos analisados.

7. Aspectos de dimensionamento considerando a interação solo-estrutura

Alguns aspectos podem ser utilizados para otimizar o dimensionamento de estruturas que considerem a interação solo-estrutura na modelagem estrutural. Certos artifícios podem ser utilizados com o intuito de reduzir, ou uniformizar os recalques. Rosa, et al (2012) relata que em determinada edificação foi utilizado um projeto de vigamento bastante rígido com o intuito de uniformizar os recalques e evitar recalques distorcionais. O vigamento foi eficiente com o previsto uniformizando parte dos recalques da estrutura.

Cabe salientar que no dimensionamento dos pilares de concreto armado sujeitos à flexão oblíqua, pode-se usufruir do dimensionamento ótimo, que consta em detalhar a armadura de tal forma a concentrar a área de aço na região mais tracionada da seção. Embora essa forma de detalhamento gere economia no dimensionamento existe o problema prático de execução que exige maior fiscalização por parte da obra e, como visto neste estudo, caso a estrutura esteja sujeita à recalques pode ocorrer a alternância no diagrama de momentos fletores dos pilares, alterando a região tracionada do pilar. Posto isso, pode-se afirmar que o dimensionamento ótimo deve levar em conta não somente aspectos de execução, mas também a interação solo-estrutura.

8. Conclusões

Foi observado nesse estudo que, ao se aplicar o deslocamento prescrito no pilar periférico, as condições de contorno do pórtico (apoio simples e engastado) não apresentaram grandes discrepâncias de valores para o diagrama de momentos fletores das vigas do pórtico e para as reações verticais dos apoios. Foi verificado a alternância no diagrama de momentos fletores nos pilares de cada andar para ambas as condições de apoio estudadas, sendo na condição de apoios engastados observado maior magnitude no valor do momento do pilar de base que não sofreu recalque. Diante dos resultados constata-se que a ocorrência de recalques diferenciais, por menor que seja, pode acarretar em aumento substancial na compressão dos pilares ou no diagrama de momentos fletores das vigas.

Pôde-se observar, diante desse estudo e da referência bibliográfica consultada, que há uma tendência de alívio de compressão nos pilares que sofrem deslocamentos prescritos, acarretando o aumento da compressão dos pilares adjacentes que não foram submetidos a deslocamentos prescritos.

Embora as condições de apoio adotadas na concepção estrutural não tenham demonstrado diferenças relevantes nos diagramas de momentos fletores, foi observado que os deslocamentos horizontais no pórtico apoiado foram maiores que do pórtico de base engastada, esse fato influencia diretamente na obtenção do coeficiente γ_z podendo gerar a necessidade de considerar efeitos de segunda ordem. Posto isso, deve-se ter precaução para que o tipo de apoio adotado no modelo estrutural seja dimensionamento de tal forma a se comportar conforme o estabelecido em modelo.

Referências

CAVALCANTI, C. S; GUMÃO, A. D; SUKAR, S. F. *Estudo da Interação Solo-Estrutura em um edifício com Patologias de Fundações na Região Metropolitana do Recife.* Revista de engenharia e pesquisa aplicada, volume 2, número 1, 2016.

DANZIGER, B; CARVALHO, E; COSTA, R, DANZIGER, F. *Estudo de Caso de Obra com Análise da Interação Solo Estrutura.* Engenharia Civil UM, número 23, 2005

IMMICH, T; KLAMT, R; SILVA, L. *Análise Comparativa Do Comportamento Estrutural De Uma Edificação Através De Modelos Computacionais Com A Consideração Da Interação Solo-Estrutura.* GEDECON, V.4, n.2, 2016.

Institution of Structural Engineers. *Soil-structure interaction. The real behaviour of structures.* Institution of Structural Engineers. v. 63, ed. 2, 120 pp. 1989.

MOTA, M. *Interação solo-estrutura em edifícios com fundação profunda.* Tese de doutorado UFSC, 2009.

PAVAN, R. C; COSTELLA, M. F; GUARNIERI, G. *Interação solo-estrutura para sistemas estruturais reticulados sobre fundações rasas.* Revista IBRACON de estruturas e materiais, volume 7, número 2, abril 2014.

ROSA, L; DANZIGER, B; CARVALHO, E. *Contribuição das alvenarias na interação solo-estrutura através do estudo de um caso envolvendo danos estruturais.* REM - Revista Escola de Minas, 2012.

SOUZA, R; REIS, J. *Interação solo-estrutura para edifícios sobre fundações rasas.* Acta Scientiarum. Technology, Volume 30, número 2, 2008.