

Análise de Interação Solo-Estrutura em Edifício de Paredes de Concreto

Elias Testoni

O.A Engenharia Especial, Blumenau, Brasil, testoni@usp.br

Márcio Roberto Silva Corrêa

EESC-USP, São Carlos, Brasil, mcorrea@sc.usp.br

RESUMO: Realizou-se o estudo dos efeitos globais causados pela interação solo-estrutura em um edifício de paredes de concreto moldadas no local com pavimento de transição sobre fundações profundas sujeito ao carregamento vertical. A análise estrutural foi feita utilizando-se um modelo de pórtico tridimensional sobre apoios elásticos. O efeito da interação solo-estrutura foi simulado por meio da aplicação de coeficientes de rigidez nos apoios da estrutura, calculados pelo método iterativo de Aoki. Os resultados obtidos indicaram que a interação solo-estrutura alterou o fluxo de tensões no edifício de maneira significativa, causando importante redistribuição de esforços nos elementos estruturais não devendo ser desprezada no dimensionamento da estrutura. Observou-se, também, a redução dos valores de recalques máximos e, principalmente dos recalques diferenciais dos apoios do edifício estudado.

PALAVRAS-CHAVE: Interação solo-estrutura, Edifício de paredes de concreto, Modelo Simplificado, Análise Estrutural.

1 INTRODUÇÃO

O sistema de paredes de concreto armado moldadas no local aplicado à construção de edifícios de múltiplos pavimentos em larga escala apresenta importantes vantagens em relação aos sistemas construtivos tradicionais devido ao seu alto grau de industrialização. Várias construtoras aplicam o sistema na construção de edifícios de múltiplos andares como os mostrados na Figura 1.



Figura 1. Edifícios de paredes de concreto.

No sistema de paredes de concreto moldadas no local, as paredes da edificação são moldadas na obra com utilização de fôrmas moduladas, geralmente metálicas. A estrutura e a vedação dos edifícios são compostas por um único elemento, a parede de concreto. Todas as paredes e as lajes de um ciclo construtivo são moldadas em uma única etapa de concretagem tornando a estrutura monolítica.

A interação solo-estrutura nos edifícios de paredes de concreto ainda é um tema pouco explorado na literatura técnica que merece a atenção dos pesquisadores e dos projetistas deste tipo de estrutura.

Neste artigo são apresentados os resultados do estudo de um edifício de paredes de concreto moldadas no local com 15 pavimentos e fundações profundas por estacas. A análise estrutural foi realizada por meio de um modelo de pórtico tridimensional composto exclusivamente por elementos finitos de barras considerando-se a influência da interação solo-estrutura por meio de método iterativo com o objetivo de analisar efeitos globais na estrutura.

2 METODOLOGIA

Os efeitos globais foram analisados por meio de uma série de comparações entre os resultados da análise estrutural de um edifício de paredes de concreto modelo. Os resultados foram obtidos pela utilização de dois modelos de pórtico tridimensional. Um dos modelos considera como indeslocáveis os apoios da estrutura, enquanto o outro analisa a estrutura sobre apoios flexíveis por meio da aplicação de coeficientes de rigidez nos apoios considerando a interação solo-estrutura. Os resultados comparados entre os modelos são: as reações na base dos pilares e os recalques estimados nos blocos de estacas. Para a análise estrutural do edifício foi utilizado o programa computacional SAP 2000. Para o cálculo dos coeficientes de rigidez foi utilizado o método de Aoki (1987).

3 INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA

Em projetos estruturais convencionais, admite-se a hipótese de indeslocabilidade para os apoios da superestrutura de edifícios. Desta forma não se consideram os efeitos causados pela deformabilidade das fundações e os recalques são estimados isoladamente para cada elemento estrutural de fundação, tendo como hipótese que o elemento possa se deslocar independentemente dos demais, ou seja, como se a superestrutura fosse infinitamente flexível. Este comportamento não condiz com a realidade geotécnica, uma vez que o solo apresenta deformações e deslocamentos causados pelo carregamento que são afetadas pela rigidez da estrutura.

Chama-se interação solo-estrutura o mecanismo de influência mútua entre a superestrutura e o sistema de fundação. O processo inicia-se na fase de construção e continua até que se atinja um estado de equilíbrio, em que as tensões e as deformações estejam estabilizadas, tanto da estrutura quanto do maciço de solos (Colares, 2006).

A interação solo-estrutura é influenciada pela rigidez da estrutura e a deformação do solo. Em edifícios convencionais causa a redistribuição dos esforços nos elementos estruturais, principalmente nos pilares, e a diminuição dos

recalques diferenciais estimados pela consideração de apoios indeslocáveis. A redistribuição dos esforços pode causar vários problemas se não for devidamente considerada, como o aparecimento de fissuras em lajes e vigas e o esmagamento de pilares. A diminuição dos recalques diferenciais pode viabilizar projetos de fundações que não seriam aceitos em uma análise convencional devido à magnitude dos recalques.

4 MÉTODOS DE ANÁLISE

4.1 Pórtico tridimensional

Para a análise estrutural do edifício estudado neste trabalho foi utilizado o modelo de pórtico tridimensional desenvolvido por Testoni (2013). No pórtico tridimensional cada parede de concreto a partir do segundo pavimento é representada por uma barra vertical flexível fixada a um par de barras horizontais rígidas em sua base e em seu topo conforme a Figura 2.

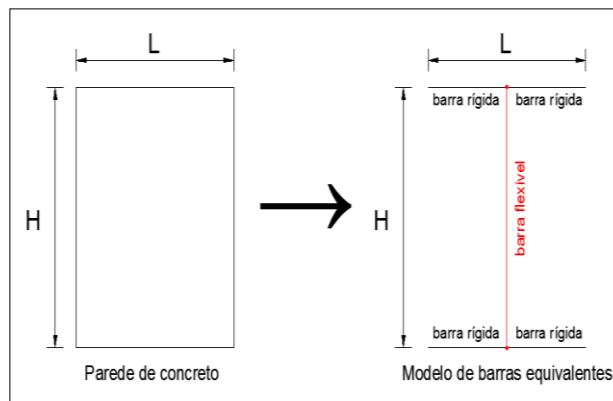


Figura 2. Discretização de uma parede.

As paredes do primeiro pavimento são discretizadas por meio de redes de elementos de barra biarticulados, de modo que o efeito arco que ocorre em paredes suportadas por vigas de transição ou por elementos de fundação flexíveis seja contemplado.

Substituindo-se cada trecho de parede por suas barras verticais e horizontais equivalentes, discretizando o primeiro pavimento com as vigas de transição por meio das redes de elementos de barra e representando os pilares usando barras obtêm-se pórticos planos, como o apresentado na Figura 3.

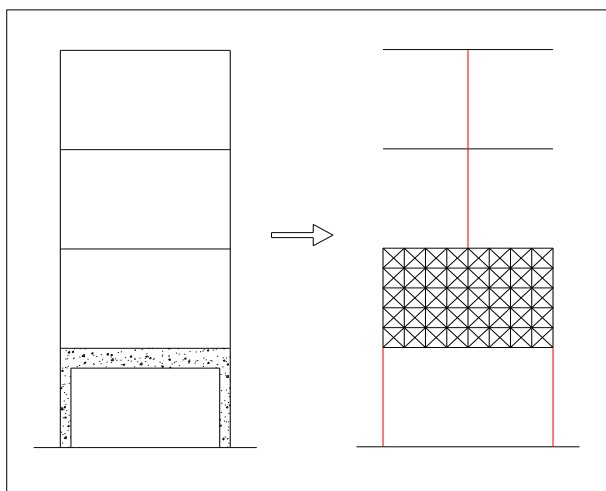


Figura 3: Pórtico plano equivalente.

Os diversos pórticos planos interligados constituem o pórtico tridimensional. A ligação entre as paredes é feita por meio de conexões articuladas. Os pórticos planos são interligados horizontalmente aos níveis dos pisos por diafragmas rígidos em seus planos que simulam as lajes de concreto. Na Figura 4 é apresentado um exemplo de pórtico tridimensional equivalente. As redes de elementos de barra na parede posterior e na parede da esquerda foram suprimidas do desenho para melhor compreensão do modelo.

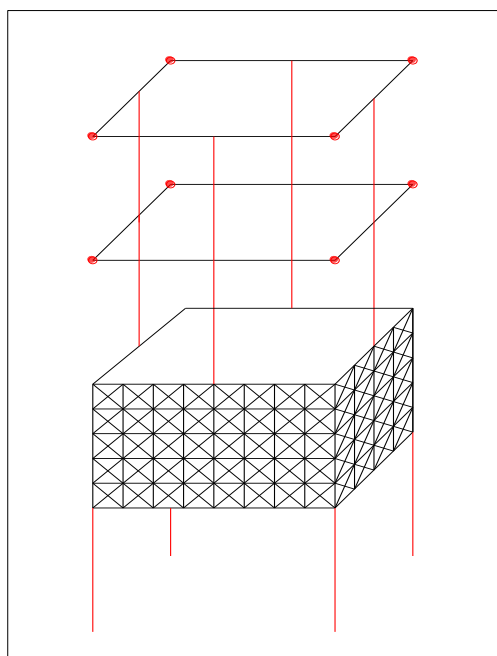


Figura 4: Pórtico tridimensional equivalente.

4.2 Análise da interação solo-estrutura

O modelo de interação solo-estrutura utilizado neste estudo é o modelo iterativo apresentado em Aoki (1987) e automatizado por Testoni (2013).

Primeiramente são calculadas as reações nos apoios da superestrutura considerando a hipótese de os apoios serem indeslocáveis. As reações nos apoios (esforços axiais e momentos) são aplicadas como cargas sobre os blocos de coroamento das estacas e é feito o cálculo inicial da distribuição das cargas axiais nas estacas de cada bloco utilizando-se o método de Schiel (1957). Determina-se a capacidade de carga geotécnica das estacas por meio do método semi-empírico de Aoki e Velloso (1975), tendo como base os resultados obtidos pela sondagem à percussão do terreno. São determinados diagramas de atrito lateral e de esforço normal das estacas. O encurtamento elástico do fuste das estacas, como peças estruturais submetidas à compressão, é determinado por meio de uma metodologia adaptada de Aoki (1979), tendo como base os valores de resistência lateral e de capacidade de carga das estacas determinados pelo método Aoki e Velloso.

O recalque do solo, na base de cada estaca é calculado considerando-se o efeito de grupo de estacas por meio do método Aoki e Lopes (1975). Novos valores de rigidez são calculados para cada estaca, dividindo-se a carga axial inicial pelo recalque total (soma do encurtamento elástico e do recalque do solo). O cálculo da distribuição das cargas para as estacas de cada bloco é refeito, considerando-se os novos valores de rigidez apurados para as estacas. O procedimento é repetido até que haja a convergência dos valores de cargas axiais das estacas entre duas iterações sucessivas com uma tolerância desejada.

Os valores de rigidez das estacas são calculados a partir das cargas axiais finais obtidas da última iteração e as deformações associadas a cada bloco são determinadas. Os coeficientes de rigidez, também conhecidos como coeficientes de mola de cada apoio, são calculados dividindo-se as reações de cada apoio (V_x, M_y, M_z) pelas correspondentes deformações ($\delta_x, \theta_y, \theta_z$).

Os coeficientes de rigidez calculados são impostos nos apoios da superestrutura. A

superestrutura é então recalculada para se determinarem novas reações nos apoios (cargas nos blocos).

Todo o procedimento é repetido até que haja a convergência dos valores das reações ou dos recalques obtidos entre duas iterações consecutivas com uma tolerância estabelecida inicialmente. No processo iterativo, as rigidezes calculadas não representam simplesmente molas isoladas, mas rigidezes que dependem dos deslocamentos do solo e do grupo de estacas, garantindo a representação da continuidade do solo no meio avaliado. Isto se dá pelo fato de que, no modelo de Aoki, o efeito do grupo de estacas é considerado no cálculo dos recalques do solo abaixo de cada estaca, ou seja, o recalque do solo abaixo de cada estaca é calculado considerando-se a influência de cada uma das demais estacas do grupo. Estes recalques são utilizados na obtenção dos coeficientes de rigidez e, conseqüentemente no cálculo das cargas dos blocos.

5 ESTUDO DE CASO

O caso avaliado é do edifício Niterói, localizado na cidade de Ribeirão Preto, projetado pela empresa OSMB Engenheiros Associados Ltda. O projeto original foi modificado para simplificar a modelagem. O edifício Niterói modificado possui 15 pavimentos e fundação com blocos de estacas do tipo Franki. A planta baixa do pavimento tipo possui dois eixos de simetria; desta forma somente um quarto do edifício foi modelado. As paredes externas e internas possuem espessura de 0,14 m e 0,12 m, respectivamente. A disposição e os nomes das paredes são apresentados na Figura 5 e na Figura 6 (as medidas são dadas em cm). Foram adotadas as siglas PH, e PV para as paredes na direção horizontal e vertical do desenho, respectivamente e LH e LV para os lintéis na direção horizontal e vertical, respectivamente.

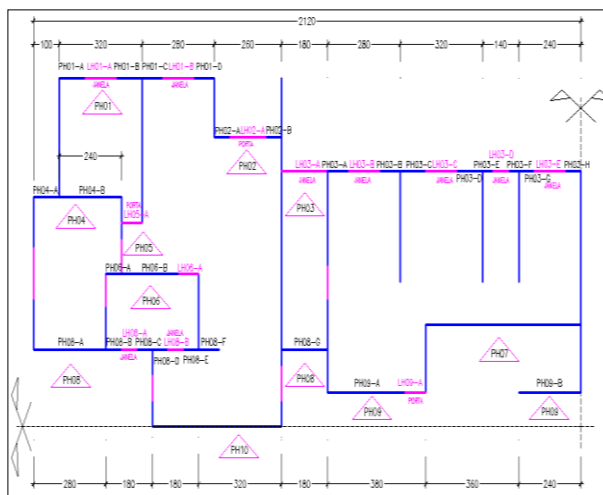


Figura 5. Planta baixa das paredes na direção horizontal.

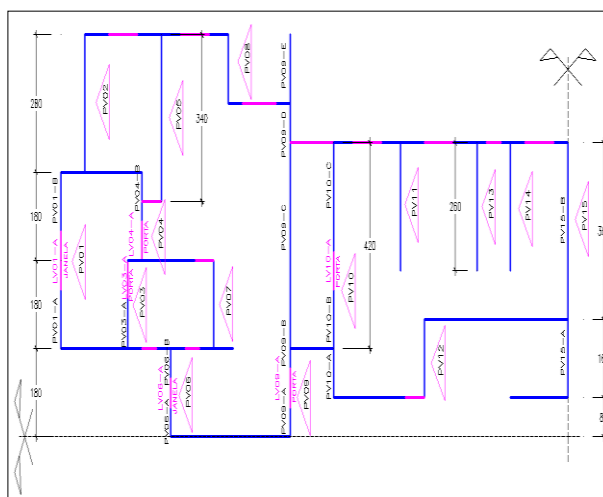


Figura 6. Planta baixa das paredes na direção vertical.

Na Tabela 1 são apresentados os carregamentos verticais nas paredes do edifício, composto pelo peso próprio das paredes e pelas cargas das lajes. Foi feita a média entre os valores de carga de cada trecho das paredes. O carregamento para cada trecho das paredes pode ser encontrado em Testoni (2013). O material utilizado foi o concreto armado com resistência à compressão de 35 MPa, módulo de elasticidade longitudinal igual a 28 GPa e coeficiente de Poisson igual a 0,20. Todas as paredes do edifício são apoiadas em vigas de transição de 0,80 m de altura e 0,14 m de espessura. As vigas de transição são suportadas por 24 pilares de 3,00 m de altura e seção transversal quadrada com 0,60 m de lado. A planta baixa esquemática do pavimento de transição é apresentada na Figura 7.

Tabela 1. Carregamento vertical nas paredes.

Parede	Pvto. Tipo (kN/m)	Cobertura (kN/m)
PH01	12,650	12,650
PH02	12,657	12,657
PH03	12,036	19,375
PH04	15,693	15,693
PH05	3,400	3,400
PH06	15,837	15,837
PH07	15,459	31,506
PH08	14,452	16,117
PH09	13,578	56,857
PH10	15,313	15,313
PV01	12,248	12,248
PV02	13,225	13,225
PV03	12,661	12,661
PV04	12,863	12,863
PV05	19,505	19,505
PV06	13,463	13,463
PV07	15,057	15,057
PV08	16,100	16,100
PV09	13,788	23,263
PV10	15,336	207,506
PV11	19,425	50,506
PV12	19,477	65,549
PV13	18,559	18,559
PV14	17,698	17,698
PV15	14,481	30,647

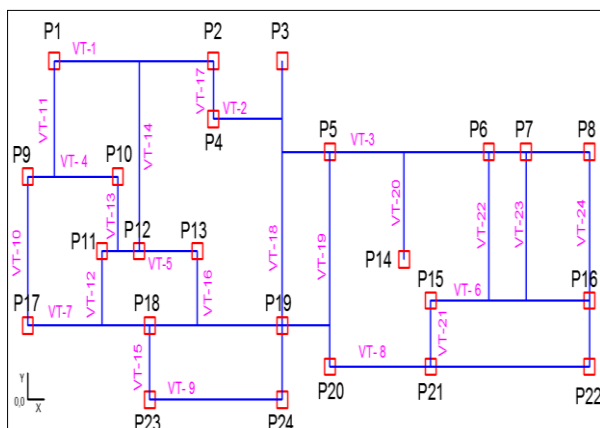


Figura 7. Planta baixa do pavimento de transição.

As fundações do edifício são constituídas de 72 estacas escavadas do tipo Franki com 0,35 m de diâmetro de fuste e 0,50 m de diâmetro de base. Foi adotado o valor de 600 kN como capacidade de carga nominal das estacas. Cada bloco de estacas recebe o carregamento de apenas um

pilar e possui 3 estacas. Os blocos de estacas foram posicionados de modo que seu centroide estivesse na mesma reta vertical do centroide dos seus respectivos pilares. A planta esquemática das fundações com a numeração e disposição das estacas é apresentada na Figura 8. Foi usada a letra B para identificar os blocos de coroamento e a letra E para identificar as estacas. Uma cruz indica o centro geométrico dos blocos.

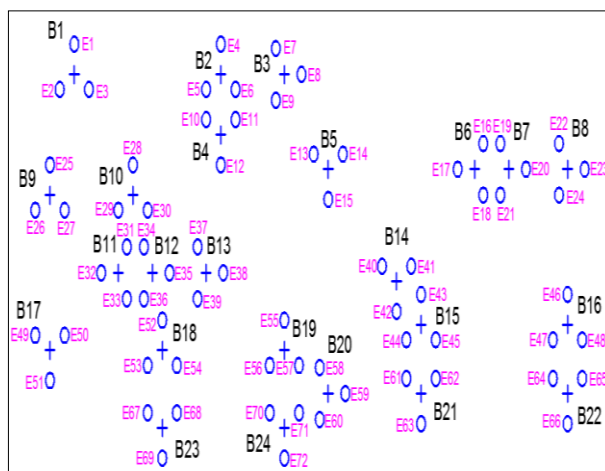


Figura 8: Localização de estacas.

O solo de fundação da obra foi caracterizado por meio de sondagens à percussão (SPT). Os perfis geotécnicos identificados nos quatro furos realizados na campanha de sondagem (S1, S2, S3 e S4) são compostos por uma primeira camada de argila silto-arenosa de consistência muito mole a média, com o índice de penetração N_{SPT} variando de 1 a 8 até a profundidade média de 10m. A segunda camada é composta por argila silto-arenosa dura, com N_{SPT} variando de 18 a 44, atingindo a profundidade média de 15,5m. A terceira e mais profunda camada identificada nas sondagens é composta por solo residual silte argilo-arenoso rijo a duro com N_{SPT} variando entre 9 e 33, atingindo a profundidade limite das sondagens igual a 20,5m.

A Tabela 2 apresenta os perfis de solo e o carregamento inicial nos blocos de coroamento das estacas considerando a indeslocabilidade dos apoios da estrutura, ou seja, antes da aplicação do método de interação solo-estrutura de Aoki. São apresentadas a reação vertical (RX) e os momentos em torno dos eixos que definem o plano horizontal (MY e MZ). Na Tabela 3 são apresentados os valores de módulo de deformação adotados para cada camada de solo.

Tabela 2. Perfis e carregamento inicial dos blocos.

Bloco	Perfil	RX(kN)	MY(kN.m)	MZ(kN.m)
B1	S1	1054,45	-43,08	-36,56
B2	S1	847,04	39,10	-14,62
B3	S3	807,08	-0,22	-49,95
B4	S1	744,65	-27,14	17,96
B5	S3	1338,52	-2,92	-36,79
B6	S4	1272,64	14,14	-35,75
B7	S4	1124,46	-0,01	-33,72
B8	S4	889,64	0,00	-33,12
B9	S1	1043,08	-37,05	-30,55
B10	S1	888,74	34,41	-20,69
B11	S2	556,95	-19,66	-36,77
B12	S2	832,22	-5,98	49,59
B13	S2	636,07	18,92	-38,65
B14	S3	780,34	-0,03	52,65
B15	S3	887,06	-36,00	-15,87
B16	S4	1250,58	0,00	8,95
B17	S2	977,04	-36,12	30,77
B18	S2	1091,51	0,89	-13,30
B19	S3	1363,53	-19,51	20,86
B20	S3	1174,74	-38,51	42,61
B21	S3	711,47	27,35	21,25
B22	S4	971,49	0,00	22,16
B23	S2	894,11	-34,87	0,00
B24	S3	884,07	35,66	0,00

Tabela 3. Módulo de deformação para cada camada.

Perfil	Profundidade Inicial (m)	Profundidade Final (m)	E (MPa)
S1	0,0	7,0	4,46
	7,0	10,0	11,34
	10,0	15,0	21,52
	15,0	20,0	7,60
S2	0,0	7,0	4,16
	7,0	10,0	8,22
	10,0	15,0	22,57
	15,0	20,0	13,05
S3	0,0	7,0	2,57
	7,0	10,0	8,22
	10,0	15,0	21,00
	15,0	20,0	25,41
S4	0,0	7,0	3,82
	7,0	9,0	3,96
	9,0	15,0	20,46
	15,0	18,0	15,75

5 RESULTADOS

São apresentados os resultados das comparações efetuadas entre o modelo de pórtico tridimensional com apoios indeslocáveis (Pórt.Ind.) e o pórtico tridimensional com apoios flexíveis (Pórt. ISE). São comparadas as reações nos pilares e os recalques nos blocos de estacas.

5.1 Reação vertical nos pilares do edifício

A comparação dos valores de reações verticais nos pilares do edifício é apresentada na Tabela 4. A diferença entre os valores das reações do modelo de pórtico com interação solo-estrutura (Pórt. ISE) foi calculada em relação às reações do modelo de pórtico com apoios indeslocáveis (Pórt. Ind).

Tabela 4. Reações verticais nos pilares.

Pilar	Pórt. Ind. (kN)	Pórt. ISE (kN)	Diferença (%)
1	1054,45	944,80	-10,40
2	847,04	672,08	-20,66
3	807,08	1165,59	44,42
4	744,65	531,18	-28,67
5	1338,52	1149,66	-14,11
6	1272,64	1169,38	-8,11
7	1124,46	1127,05	0,23
8	889,64	1285,75	44,52
9	1043,08	821,22	-21,27
10	888,74	536,38	-39,65
11	556,95	768,69	38,02
12	832,22	696,08	-16,36
13	636,07	781,77	22,91
14	780,34	980,02	25,59
15	887,06	924,62	4,23
16	1250,58	1175,48	-6,01
17	977,04	1157,36	18,46
18	1091,51	770,45	-29,41
19	1363,53	1009,54	-25,96
20	1174,74	1014,91	-13,61
21	711,47	1052,93	47,99
22	971,49	1269,25	30,65
23	894,11	968,68	8,34
24	884,07	1048,62	18,61
Coef.Var:23%		Coef.Var:23%	Média:22%

5.2 Recalques nos blocos de estacas

O valor do recalque de cada bloco em cada um dos pórticos e a diferença entre os valores dos dois modelos são apresentados na Tabela 5. Na Tabela 6 são apresentadas informações complementares sobre os resultados. São apresentados os valores de recalque absoluto máximo, recalque diferencial máximo, o recalque médio e o coeficiente de variação. Os resultados são apresentados para os dois modelos e as diferenças percentuais apresentadas foram calculadas para o pórtico com interação solo-estrutura (Pórt. ISE) em relação aos resultados do pórtico com apoios indeslocáveis (Pórt. Ind.).

Tabela 5. Recalques estimados nos blocos.

Bloco	Pórt. Ind. (mm)	Pórt. ISE (mm)	Diferença (%)
1	31	27	-12,3
2	32	27	-16,3
3	20	26	34,1
4	34	27	-18,9
5	30	27	-12,1
6	28	26	-6,1
7	26	26	1,3
8	17	26	47,9
9	33	27	-16,8
10	38	28	-27,2
11	25	27	7,3
12	31	27	-12,3
13	25	27	4,9
14	23	26	13,5
15	24	26	7,7
16	26	26	-0,9
17	24	27	13,7
18	34	27	-19,4
19	34	27	-20,2
20	29	27	-8,8
21	19	26	37,5
22	20	26	31,8
23	26	27	1,2
24	25	27	8,3

Tabela 6. Informações sobre os recalques dos blocos.

	Pórt. Ind.	Pórt. ISE	Diferença (%)
Recalque Máximo (mm)	37,8	27,6	-27,1
Recalque Dif. Máx. (mm)	20,4	1,8	-91,1
Recalque Médio (mm)	27,2	26,6	-2,8
Coef. de Variação (%)	20	1,9	-90,3

5.3 Análise dos resultados

Na comparação da reação vertical dos pilares do edifício, podem ser vistas diferenças importantes causadas pela interação solo-estrutura. O fluxo de tensões foi consideravelmente alterado, causando o incremento de carga nos pilares de até 48%, como ocorreu no pilar P21 e o alívio de até 40%, como no pilar P10. Notam-se que alguns dos maiores incrementos de carga ocorreram em pilares originalmente menos carregados (P21, P11, P13 e P14) e em pilares com nível intermediário de carregamento (P8, P22, P3 e P24). Por outro lado, os maiores alívios de carga se deram em alguns dos pilares originalmente mais carregados (P19, P18 e P5) e em alguns pilares com nível intermediário de carregamento (P10, P9, P2 e P12).

Na comparação dos recalques, o efeito da interação solo-estrutura que fica mais claro é a grande homogeneização que ocorreu no recalque vertical dos blocos de estacas, evidenciado pela grande diferença que existe entre os valores dos coeficientes de variação calculados para os dois modelos e pela diminuição de 91% do recalque diferencial máximo no modelo Pórtico ISE. O valor do coeficiente de variação dos recalques passou de 20% para o pórtico com apoios indeslocáveis para apenas 2% no pórtico com interação solo-estrutura. Além disto, houve também a redução de 27% do recalque máximo calculado.

6 CONCLUSÕES

A interação solo-estrutura causou alteração importante do fluxo de tensões do edifício de paredes de concreto e, portanto, não deve ser desprezada no dimensionamento dos elementos estruturais.

A consideração da interação solo-estrutura causou a homogeneização dos valores estimados

para os recalques dos apoios do edifício de paredes de concreto, com a diminuição dos recalques máximos e principalmente dos recalques diferenciais.

AGRADECIMENTOS

À OSMB Engenheiros Associados pelos desenhos do edifício utilizado neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Aoki, N. (1979) Considerações sobre o projeto e execução de fundações profundas, *Seminário de Fundações*, Sociedade Mineira de Engenharia, Belo Horizonte.
- Aoki, N. (1987). Modelo Simples de Transferência de Carga de Estaca Vertical Sujeita a Carga Axial de Compressão, *III Ciclo de Palestras Sobre Engenharia de Fundações*, ABMS/NR-Nordeste, Recife.
- Aoki, N. e LOPES, F.R. Estimating Stresses and Settlements Due to Deep Foundations by The Theory of Elasticity, *5th Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1975, Buenos Aires. Proceedings,, Buenos Aires, Tomo. I, p. 377-386.
- Aoki, N. e Velloso, D.A. An Approximate Method to Estimate the Bearing Capacity of Piles, *5th Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1975, Buenos Aires. Proceedings,,, Tomo. I, p. 367-376.
- Colares, G.M. (2006) *Programa para a Análise de Interação Solo-estrutura no Projeto de Edifícios*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 82 p.
- Schiell, F. *Estática de Estaqueamentos*. 2. ed. São Carlos: EESC-USP, 1957.
- Testoni, E. (2013) *Análise Estrutural de Edifícios de Paredes de Concreto Por Meio de Pórtico Tridimensional Sobre Apoios Elásticos*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 219 p.