

Análise de Bloco de Fundação com Estacas com Comprimentos Desiguais

José Luiz Gonçalves Brandi
UTFPR, Curitiba, Brasil, brandi@prospectinfo.com.br

Luiz Henrique Felipe Olavo
ENSOLO Engenharia de Solos e Fundações Ltda, Pinhais, Brasil, luiz@ensolo.com.br

Luiz Russo Neto
PUC PR, Curitiba, Brasil, luiz.russo@pucpr.br

RESUMO: Apresenta-se a análise de um bloco de fundação associando os pilares dos elevadores e da escada de um edifício residencial de 27 pavimentos mais um subsolo localizado no centro de Curitiba, Paraná. Buscando-se uma distribuição de carga mais igualitária entre as estacas, quando da ocorrência dos esforços de vento, as estacas da periferia e cantos tiveram seus comprimentos reduzidos em 1 m e 2 m, respectivamente, de modo que tivessem um comportamento menos rígido, absorvendo menos carga devido ao carregamento vertical de longo prazo, sendo que, porém, ainda teriam uma responsabilidade maior quando ocorressem os momentos devido à sua posição mais externa no bloco. Com esta alteração, observou-se um acréscimo no recalque médio deste bloco da ordem de 2,2 mm quando se considerou o mesmo como sendo rígido. O bloco foi então modelado com auxílio do software SAP 2000, de modo a se obter a distribuição de carga entre as estacas considerando-se a rigidez do bloco. O solo do local da obra é constituído por aterro, além de argila siltosa e silte argiloso da formação Guabirotuba e solo residual. As estacas foram dispostas em uma malha regular de (4 x 8) estacas, com distância entre eixos limitada em função da restrição de espaço por conta da cortina de contenção adjacente. A propósito, a cortina de contenção havia tido o comprimento de suas estacas aumentado com o objetivo de se chegar a uma distorção angular de 1:500 de modo a se atender aos requisitos da norma de desempenho de edifícios habitacionais, NBR 15575 (ABNT, 2013b). Desta forma, o aumento no recalque do bloco analisado pode também trazer economia às estacas da cortina de contenção, com redução no comprimento. Esta análise foge do escopo deste artigo e não está sendo apresentada, porém justifica economicamente o presente estudo.

PALAVRAS-CHAVE: Interação Solo-Estrutura, Previsão de Recalques, Bloco sobre Estacas.

1 INTRODUÇÃO

Apresenta-se um caso de obra onde é analisado o bloco central de um edifício residencial de 27 pavimentos mais um subsolo, sendo este bloco responsável pelo suporte de três pilares, sendo dois referentes aos elevadores e um relativo à escada de incêndio.

Este bloco, com 6,6 m de largura, 13,6 m de comprimento e 2,5 m de altura, para três pilares é responsável por suportar 43300 kN de carga vertical combinada quando consideradas as

cargas permanentes e mais a sobrecarga, além de um momento em torno do eixo x de 40375 kN.m quando da incidência de vento na direção de 90 graus e um momento em torno do eixo y de 17585 kN.m quando da incidência de vento na direção de 180 graus. Os esforços de vento também são responsáveis pelo acréscimo ou alívio de até 2770 kN de carga vertical.

Para suportar estas cargas foi dimensionado um bloco apoiado sobre 32 estacas escavadas com lama, com 80 cm de diâmetro e comprimento de 23 metros.

Os recalques das estacas de toda a obra foram calculados através do método de Aoki-Lopes (Aoki e Lopes, 1975), baseado na teoria da elasticidade, e os comprimentos das estacas de maior recalque foram aumentados até que se atingisse um recalque diferencial específico de 1:500, requerido pela norma de desempenho de edifícios habitacionais, NBR 15575 (ABNT, 2013b). Esta norma requer que este recalque diferencial específico seja obtido considerando-se um carregamento igual à soma de 100% das cargas permanentes e mais 70% das cargas acidentais. Para esta obra em específico, foi considerada toda a carga permanente e mais toda a sobrecarga uma vez que não se possuíam os valores separados de cada esforço.

Após realizar-se o cálculo dos recalques das fundações concluiu-se que este bloco apresentava um dos menores recalques da obra. Acredita-se que a razão para isto seja o fato dos pilares de elevador fornecerem a maior parte da rigidez do edifício para os esforços transversais, tendo, desta forma, grande parte do seu carregamento proveniente de esforços de curta duração, os quais não são considerados quando se calculam recalques, contando, desta forma, com uma margem de segurança maior no momento da previsão dos recalques. Além disso, este bloco possuía estacas fundas, com suas pontas próximas ao que foi considerado indeslocável no cálculo (apenas três metros acima do indeslocável).

Próximo a este bloco localiza-se um trecho da cortina de contenção do edifício, a qual era em estacas de perfil pranchado com tirantes por tratar-se da escavação de um único subsolo e pelo fato da escavação não atingir ainda o nível d'água. Devido à pequena altura de escavação, as estacas de contenção apresentavam comprimentos muito inferiores ao das estacas do bloco, o que levou a cotas de ponta bastante distintas e recalques diferenciais pronunciados. Desta forma, as estacas de contenção tiveram seus comprimentos aumentados para atender os requisitos da norma de desempenho. A elevação deste trecho de cortina encontra-se na figura 1.

Buscando-se na literatura, encontrou-se o trabalho de Sales e Bittencourt (2010), no qual foram modelados blocos de fundação com estacas de comprimentos desiguais, buscando

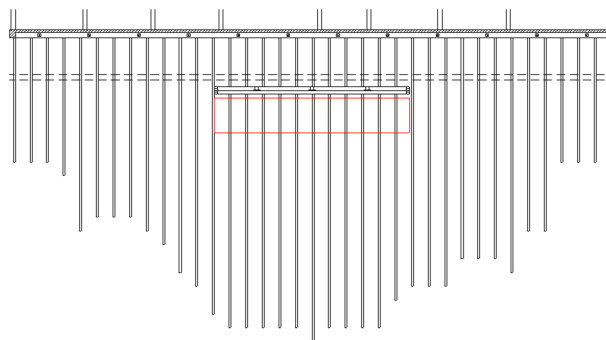


Figura 1. Elevação da cortina próximo ao bloco estudado. A região do bloco está indicada.

uma distribuição mais uniforme da carga entre estacas quando foi considerada a carga vertical atuante em conjunto com os momentos. Sales e Bittencourt concluíram que nestes casos a distribuição de carga entre as estacas torna-se mais uniforme, porém às custas de um pequeno aumento no recalque médio do conjunto de estacas. No caso em estudo, um aumento no recalque deste bloco em específico conduziria à possibilidade de um maior recalque da cortina, possibilitando estacas mais curtas e trazendo economia para a obra, o que motivou este estudo. Desta forma, optou-se por modelar o comportamento deste bloco, reduzindo as quatro estacas dos cantos para 21 metros e as demais estacas da periferia para 22 metros, enquanto mantinham-se as estacas centrais do bloco com 23 metros.

2 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

A obra em estudo localiza-se no centro de Curitiba, na Rua Treze de Maio, próxima à esquina da Rua Riachuelo. Foram executados anteriormente à fase de projeto seis furos de sondagem à percussão, os quais indicaram a presença de aterro de calça com silte argiloso de pequena espessura (máximo de 1,48 metro) seguido de camada de argila siltosa ou silte argiloso, pertencentes à formação Guabirota, até uma profundidade máxima de 9,83 metros, sendo que a maioria das sondagens indicou esta camada até cerca de sete metros e subjacente a esta camada a presença de silte arenoso até o limite de sondagem. Este silte arenoso trata-se de solo residual e as baixas penetrações obtidas para os índices do SPT próximas ao limite de sondagem indicam que as mesmas pararam

próximo ao topo rochoso. Um gráfico com os índices de N_{SPT} versus a profundidade é apresentado na Figura 2.

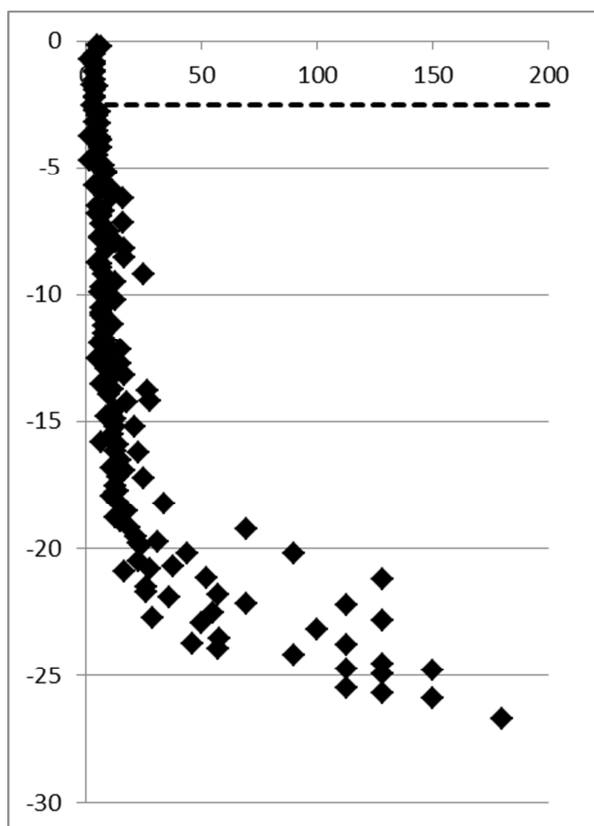


Figura 2. Valores de N_{SPT} versus a profundidade em relação ao RN. A cota de escavação está indicada pela linha tracejada.

3 ANÁLISE DO BLOCO SOBRE ESTACAS

Para fundação dos pilares do elevador foi adotado um bloco sobre 32 estacas escavadas com lama com 80 cm de diâmetro e comprimento de 23 metros. As estacas estão dispostas conforme uma matriz retangular de 8 x 4 estacas, com um afastamento de centro a centro de 180 cm, equivalente a 2,25 vezes o diâmetro. Foi adotado um afastamento reduzido devido à proximidade do bloco com a cortina de contenção, que impossibilitou um afastamento maior.

Inicialmente foi calculado o recalque destas estacas considerando apenas a carga permanente e mais a sobrecarga. Esta hipótese de carga, apresentada no projeto estrutural continha apenas cargas verticais. Como o bloco encontra-se centrado com o centro de carga dos

pilares para esta situação e foi considerado rígido, foi adotada uma distribuição de carga equalitária entre as estacas.

Em seguida, o bloco foi modelado no software SAP 2000, versão 18.0.1, versão de avaliação (Computers and Structures, Inc.), buscando verificar os efeitos da rigidez do bloco na distribuição de carga entre estacas, ainda considerando-se as estacas com o mesmo comprimento.

Observou-se pouca variação na carga atuante entre as estacas, entre 1301 e 1452 kN, indicando que o bloco trabalha como um corpo rígido. Observaram-se recalques maiores para o lado interno da obra que para o lado próximo à cortina, provavelmente devido à diferença no carregamento do solo entre estes dois lados, além de recalques maiores das estacas mais próximas ao fundo da obra, também possivelmente devido à diferença no nível de carregamento do solo da obra. O recalque médio do bloco foi de 6,41 mm. As figuras 3, 4 e 5 mostram as estacas deste bloco em relação à obra e as deformações deste bloco.

Em seguida, foram calculados os recalques das estacas considerando-se os comprimentos diferentes, sendo que os comprimentos diferentes levaram a coeficientes de mola diferentes, o que levou a uma maior variação na carga aplicada por estaca. Os recalques foram recalculados considerando as cargas obtidas desta forma e obtiveram-se novos coeficientes de mola, tornando desta forma o processo iterativo até que a maior variação na carga por estaca ficasse abaixo de 10 kN (1 tf).

Observou-se que as estacas mais curtas, localizadas nos cantos do bloco, apresentavam recalques que pouco dependiam da carga atuante em seu topo. Desta forma, a sua carga foi reduzindo-se, estabilizando-se em patamares bastante reduzidos em relação às cargas das demais estacas. Estes recalques são bastante dependentes do nível de carregamento do maciço de solo em torno destas estacas, lembrando que os recalques foram calculados sempre com o carregamento proveniente de todas as estacas existentes na obra.

As cargas atuantes nas estacas de 21 metros ficaram entre 52 e 218 kN, sendo as duas estacas localizadas no fundo da obra, opostas à rua, as estacas de menor carga. As estacas de 22

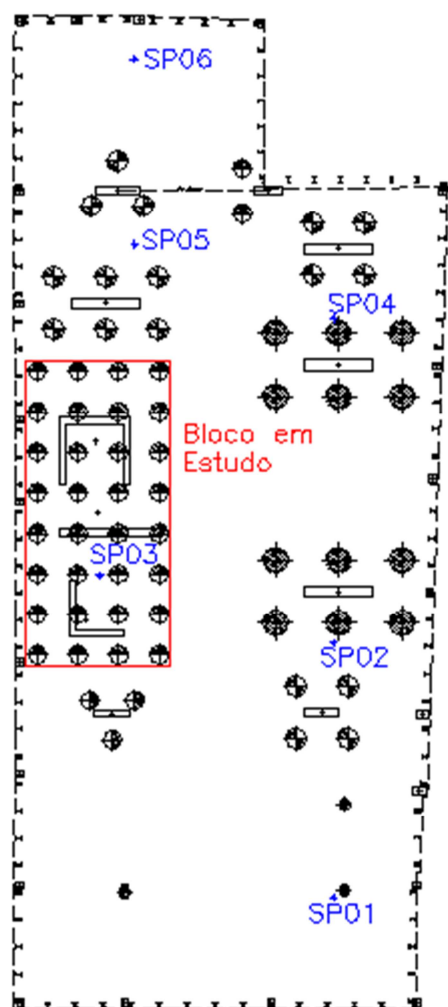


Figura 3. Situação do bloco em estudo em relação à obra. A rua localiza-se na parte de baixo do desenho.

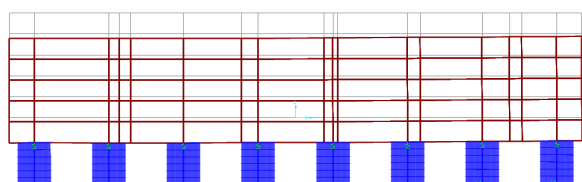


Figura 4. Deformação do bloco original conforme seu sentido longitudinal.

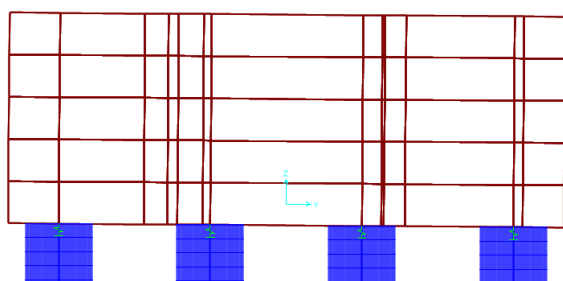


Figura 5. Deformação do bloco original conforme seu sentido transversal.

metros, localizadas na periferia do bloco, exceto nos cantos, ficaram com cargas variando entre

670 e 1418 kN, sendo observadas cargas maiores nas estacas localizadas nas fileiras centrais do bloco quando considerado o sentido longitudinal do mesmo. Para as estacas centrais, com comprimento de 23 metros, as cargas variaram entre 2074 e 2433 kN, sendo a carga máxima equivalente a 168% a carga máxima atuante na hipótese de bloco com todas as estacas iguais e somente as cargas permanentes e acidentais (sem vento).

O recalque médio para o bloco com estacas desiguais ficou em 8,60 mm, maior que para o bloco com estacas iguais. Também se observaram recalques maiores nas estacas voltadas ao centro da obra e aos fundos. A tabela 1 mostra os valores de recalque médio e das rotações dos blocos para ambos os casos, comparando-os.

Tabela 1. Comparação entre as deformações do bloco original e do bloco com estacas com comprimentos diferentes.

Bloco	Recalque médio (mm)	Rotação em torno do eixo longitudinal	Rotação em torno do eixo transversal
Original	6,41	1:15899	1:5745
Desiguais	8,60	1:11150	1:3776
Acréscimo	34%	43%	52%

Observa-se que todas as deformações aumentaram, não apenas o recalque médio do bloco. A análise foi feita sem a consideração da estrutura toda, mas provavelmente a estrutura imporá um momento sobre este bloco devido a alguma restrição a estas rotações por conta da sua rigidez.

Cogitou-se, inicialmente a verificação da contribuição do solo sob o bloco, considerando-se o mesmo atuando como um radier estaqueado. As baixas cargas obtidas para as estacas mais curtas fizeram os autores abandonarem esta ideia, uma vez que estas, mesmo apoiadas 21 metros abaixo do fundo do bloco ainda apresentavam recalques que fizeram com que ficassem flexíveis demais para agirem como apoios. Esperam-se deformações maiores por atrito negativo para o solo imediatamente abaixo do fundo do bloco, o que faria com que a resistência mobilizada pelo mesmo atuando como um radier fosse muito baixa. Desta forma, a resistência do solo imediatamente abaixo do bloco foi desprezada.

Em seguida foram introduzidos os esforços provenientes do vento na análise. Como os esforços de vento são relativos a uma rajada de 3 segundos (ABNT, 2013a), considerou-se que os mesmos não contribuem para os recalques de longo prazo e que os coeficientes de mola obtidos para as estacas não estariam coerentes uma vez que foram obtidos considerando recalques por adensamento. Desta forma, os esforços de vento nas estacas foram considerados proporcionais à distância da estaca ao centro do bloco, da mesma forma caso fossem consideradas estacas iguais e bloco rígido. Tal hipótese torna-se semelhante à proposta por Fellenius (2016) em seu método unificado de projeto, onde ele propôs que, pela curta duração dos esforços de vento, os mesmos somente anulariam parte do atrito negativo.

Como os acréscimos de carga são diferentes para cada um dos três pilares para cada sentido de vento, o centro do carregamento também desloca-se, adicionando momentos ao bloco. A tabela 2 indica os esforços resultantes para as quatro hipóteses de vento consideradas.

Tabela 2. Esforços provenientes do vento

Vento (graus)	Nk (kN)	Mxk (kN.m)	Myk (kN.m)
0	-2770	-1242	17585
90	-300	-40375	391
180	2770	1242	-17585
270	300	40375	-391

Para o bloco original, as cargas por estaca variaram entre 881 e 1937 kN, o que levou à adoção no projeto de armaduras de 4,0 metros com o objetivo de se absorver os esforços horizontais. A estaca mais carregada é uma estaca de um dos cantos do bloco.

Para o bloco com estacas com comprimentos variados, as estacas dos cantos tiveram o seu carregamento variando entre -398 e 687 kN, o que levou à necessidade de uma armadura maior, com comprimento de 11,0 metros para absorção dos esforços de tração (negativos). As estacas da periferia ficaram com carga variando entre 247 e 1897 kN e as estacas centrais ficaram com carga variando entre 1940 e 2754 kN.

Comparando a estaca mais carregada dos cantos, com a estaca mais carregada da periferia e com a estaca mais carregada central, obtêm-se

as seguintes razões: 1:2,76:4,01, sendo a estaca do canto a menos carregada. Desta forma, conclui-se que a redução no comprimento foi excessiva, deixando de se obter uma distribuição de carga mais uniforme. Sugere-se que seja feita uma análise deste mesmo bloco considerando uma redução de metade da empregada neste artigo ou considerando as estacas dos cantos com o mesmo comprimento das demais estacas da periferia.

Comparando-se a estaca mais carregada do bloco original com a estaca mais carregada do bloco alterado, percebe-se que o bloco alterado sobrecarregou a estaca mais carregada em 42%, o que também indica que a redução de comprimento empregada foi excessiva.

Para fins de comparação foram calculados os recalques das estacas considerando-se o bloco isolado, ou seja, desprezando-se o carregamento imposto ao solo pelas demais estacas da obra. O que foi verificado foi que os recalques reduziram-se significativamente, ficando o recalque médio com 3,76 mm para o bloco com estacas iguais, o que fez com que as deformações do bloco ganhassem importância. Como o bloco trabalhou como sendo mais flexível em relação às estacas, a distribuição de carga entre as estacas mudou. Para o bloco com as estacas iguais isolado a carga por estaca variou entre 1172 e 1574 kN quando consideradas apenas as cargas de peso próprio e sobrecarga, contra uma variação entre 1301 e 1452 kN quando considerado o carregamento de todas as estacas da obra. Para a consideração do vento as cargas por estaca variaram entre 686 e 2025 kN para o bloco isolado contra 881 a 1937 kN para o bloco com estacas iguais considerando o carregamento de todas as estacas atuante sobre o maciço de solo. A tabela 3 mostra a comparação dos recalques e rotações do bloco considerando o bloco isolado e com o

Tabela 3. Comparação entre as deformações do bloco com estacas de igual comprimento original (com as cargas de todas as estacas da obra consideradas na análise) e do bloco isolado.

Bloco	Recalque médio (mm)	Rotação em torno do eixo longitudinal	Rotação em torno do eixo transversal
Original	6,41	1:15899	1:5745
Isolado	3,76	1:560000	1:135000
Redução	41%	97%	96%

maciço de solo carregado por todas as estacas da obra.

Para o bloco com estacas desiguais isolado foram obtidos os seguintes valores. Considerando-se apenas o peso próprio e sobrecarga as cargas variaram entre 530 e 627 kN para as estacas dos cantos, entre 1088 e 1246 kN para as estacas da periferia e entre 1656 e 1894 kN para as estacas centrais. O recalque passou a ser de 4,74mm. A tabela 4 mostra a comparação entre as deformações do bloco com estacas diferentes isolado e do bloco com estacas diferentes considerando todas as estacas da obra. Com a introdução dos esforços de vento, a carga nas estacas dos cantos variou entre 64 e 1095 kN, nas estacas da periferia variou entre 701 e 1697 kN e para as estacas do centro do bloco variou entre 1479 e 2194 kN. Não foram observadas solicitações de tração nas estacas dos cantos do bloco, ao contrário do que se observou para o bloco considerando o efeito das demais estacas da obra. A razão entre as cargas máximas foi de 1:1,55:2,00, mais uniforme que a razão de 1:2,76:4,01 observada para o bloco considerando todas as estacas.

Tabela 4. Comparação entre as deformações do bloco com estacas de comprimentos diferentes original (com as cargas de todas as estacas da obra consideradas na análise) e do bloco isolado.

Bloco	Recalque médio (mm)	Rotação em torno do eixo longitudinal	Rotação em torno do eixo transversal
Original	8,60	1:11150	1:5745
Isolado	4,74	1:560000	1:77143
Redução	45%	98%	92%

4 CONCLUSÕES

A análise indicou que a carga atuante nas estacas dos cantos do bloco alterado ficou muito baixa quando considerado o carregamento de longo prazo. Este fato ocorreu devido ao fato das estacas terem seus recalques variando muito pouco em função da carga atuante no seu topo, o que levou a um comportamento muito flexível e capacidade de carga baixa.

A estaca mais carregada entre as estacas centrais do bloco alterado ficou com uma carga 68% superior à maior carga atuante nas estacas do bloco original quando consideradas as cargas

de longo prazo. A carga da estaca mais carregada do bloco alterado aumentou 42% em relação à estaca mais carregada do bloco original quando considerados os carregamentos de vento, devendo-se notar apenas que a estaca mais carregada do bloco alterado é uma das estacas centrais, enquanto no bloco original a mesma é uma das estacas da periferia.

A razão entre as estacas mais carregadas dos cantos para a estaca mais carregada da periferia do bloco para a estaca mais carregada central do bloco alterado ficou em 1:2,76:4,01, indicando que a redução empregada no presente estudo foi excessiva.

Sugere-se refazer o presente estudo com metade da redução de comprimento empregada para as estacas ou deixando as estacas dos cantos no mesmo comprimento das demais estacas da periferia do bloco.

REFERÊNCIAS

- Aoki, N. e Lopes, F.R. (1975). Estimating Stress and Settlements due to Deep Foundations, *V Conf. Panam. Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Buenos Aires, Vol. 1, p. 377-386.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013a) NBR 6123, Forças Devido ao Vento em Edificações, versão corrigida 2, incorporando a errata 2 de 2013 à NBR 6123/1988, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013b) NBR 15575, Desempenho de Edifícios Habitacionais, Rio de Janeiro.
- Fellenius, B.H. (2016). Basics of Foundation Design. Versão digital obtida de www.Fellenius.net em 24/04/2016.
- Sales, M.M. e Bittencourt, D.M.A. (2010) *Análises de Fundações Utilizando Estacas de Diferentes Comprimentos*, Cobramseg 2010, Anais, Gramado.