

## Coeficiente de Reação Vertical obtido em Instrumentação

Celso Nogueira Corrêa  
Sócio, ZF & Eng. Assoc, São Paulo, Brasil, celso@zfsolos.com.br

Frederico Fernando Falconi  
Sócio-Diretor, ZF & Eng. Assoc, São Paulo, Brasil, fred@zfsolos.com.br

**RESUMO:** O objetivo desse trabalho é contribuir para a discussão da interação solo-estrutura. Em um edifício com mais de 60 m de altura e 40 pilares e fundação em estacas metálicas de seção decrescente com a profundidade até 40 m, foram colocados pinos nos pilares e feitas leituras de recalque até sua estabilização. A estabilização ocorreu aproximadamente no final da obra. As leituras de recalques possibilitaram obter o coeficiente de reação vertical nos blocos de 3 até 14 estacas. Pretende-se mostrar as provas de carga estáticas, os gráficos de leitura dos recalques e em especial, que o coeficiente de reação vertical varia e tem distribuição errática dentro de uma mesma obra, independente do número de estacas do bloco. Como informação adicional, será mostrada a compatibilidade das leituras de recalque com os deslocamentos durante as provas de carga estáticas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Coeficiente Reação Vertical, Interação Solo-Estrutura, Recalques, Instrumentação.

**ABSTRACT:** The aim of this paper is to contribute to the discussion of soil-structure interaction. In a building with more than 60 m of height and 40 pillars and foundation in H-piles of decreasing section with depth up to 40 m, pins were installed in the pillars and settlements were controlled until their stabilization. Stabilization occurred approximately at the end of the construction. The settlements control allowed to obtain the vertical reaction coefficient in the blocks of 3 to 14 piles. It is intended to show the static load tests, the graphs of the settlements control, and in particular, that the vertical reaction coefficient varies and has an erratic distribution within the same worksite, regardless of the number of piles in the block. As an additional information, the compatibility of the settlements measured with the displacements observed in the static load tests will be shown.

**KEYWORDS:** vertical reaction coefficient, soil-structure interaction, settlements, instrumentation.

## 1 Introdução

É sabido que a interação solo-estrutura é um assunto onde ainda há a necessidade de muitos estudos, e, sobretudo de monitoração do comportamento das estruturas para que haja possibilidade de avanço das pesquisas. Com a revisão da norma NBR6122/2010, o controle de recalques para edifícios acima de 60 m de altura se tornou obrigatório e ajudou nos avanços, ainda tímidos, dessas pesquisas.

Nesse trabalho será mostrado o controle de recalques de um edifício com um subsolo, térreo, 4 lajes de garagem, 16 pavimentos tipo e cobertura totalizando 22 lajes e aproximadamente 67,50 m de altura, construído na Baixada Santista com fundação em estacas metálicas com seção decrescente e aproximadamente 40 m de comprimento. A geometria do corpo do prédio em planta é bastante assimétrica que induz uma dificuldade a mais na interpretação dos dados (figura 1)

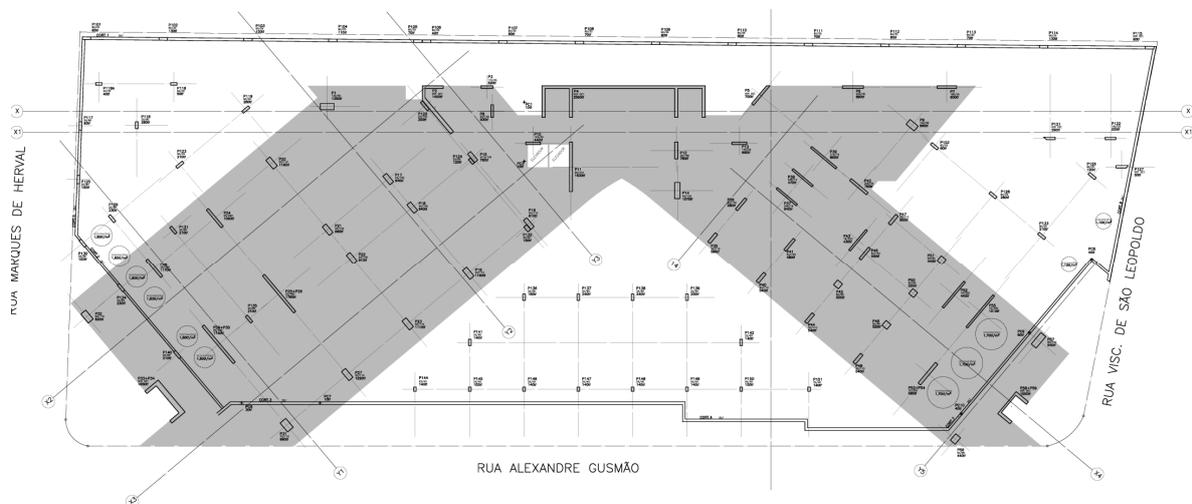


Figura 1 : Geometria do corpo do prédio em planta.

O controle de recalques, as provas de carga estáticas e demais dados de projeto e obra, permitiu obter coeficiente de reação vertical em cada bloco e verificar a variabilidade desse parâmetro com o número de estacas no bloco, nível de carregamento etc. Além disso, será mostrada também uma comparação entre os deslocamentos obtidos nas provas de carga estática com as respectivas leituras de recalque nos pilares.

## 2. Previsão da Capacidade de Carga das Estacas

A previsão da Capacidade de Carga das Estacas, foi baseada em 9 sondagens à percussão, sendo que 3 delas foram complementadas com sondagens rotativas ao se atingir o topo rochoso, e em uma prova de carga estática realizada previamente ao projeto, cerca de um ano antes.

Os métodos semi-empíricos utilizados nessa estimativa foram Décourt-Quaresma e Falconi-Perez, dois dos métodos mais utilizados para essa região da Baixada Santista. Para esse trabalho foram acrescentados os métodos Aoki-Veloso e P.P.Velloso para efeito de comparação.

O perfil geotécnico característico dessa região é composto por uma camada de 1,50 m de aterro de areia com material variado (pedras, entulhos etc) sobre uma camada de areia fina até 7,00 m de profundidade. Sob a areia, segue 25,00 m de argila marinha pouco arenosa, muito mole (SFL) intermediada por uma camada de areia de 1,00 m de espessura. Segue ainda 8,00 m de silte arenoso medianamente compacto (provável solo residual), mais 4,00 m de silte bastante arenoso com fragmentos de rocha, muito compacto e 7,00 m de areia fina muito compacta. Nesse ponto foi atingido o topo rochoso, 51,50 m e a rotativa foi até 56,00 m em rocha, biotita gnaisse com recuperação 100% a partir de 54,00 m (Figura 2).

O nível d'água foi encontrado a 1,30 m de profundidade.

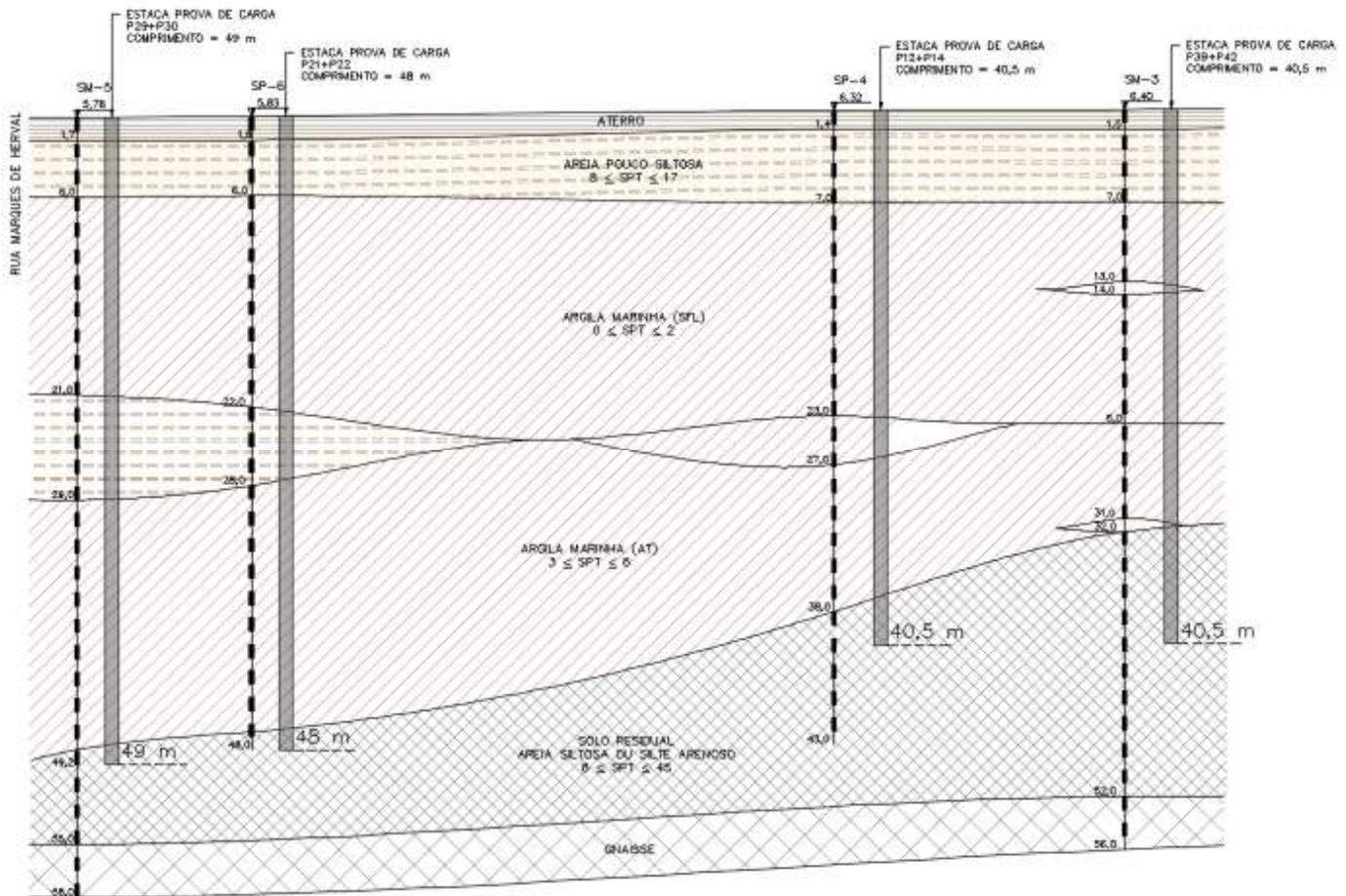


Figura 2 : Perfil geotécnico

Na tabela 1, estão indicados os resultados das estimativas de capacidade de carga média dos quatro métodos nas 9 sondagens com os respectivos Desvios Padrão e Coef. De Variação.

Tabela 1: Estimativa de Capacidade de Carga

	Aoki-Velloso	Décourt-Quaresma	P.P.Veloso	Falconi-Perez
Média ( $\bar{S}$ )	4379 kN	4838 kN	6341 kN	3635 kN
Desvio Padrão ( $\sigma_S$ )	1076 kN	898 kN	1008 kN	415 kN
Coef. Variação (CV)	23 %	19 %	16 %	11 %

Ainda com o objetivo de determinação da carga admissível de projeto da estaca, foi realizada uma prova de carga estática prévia (figura 3).

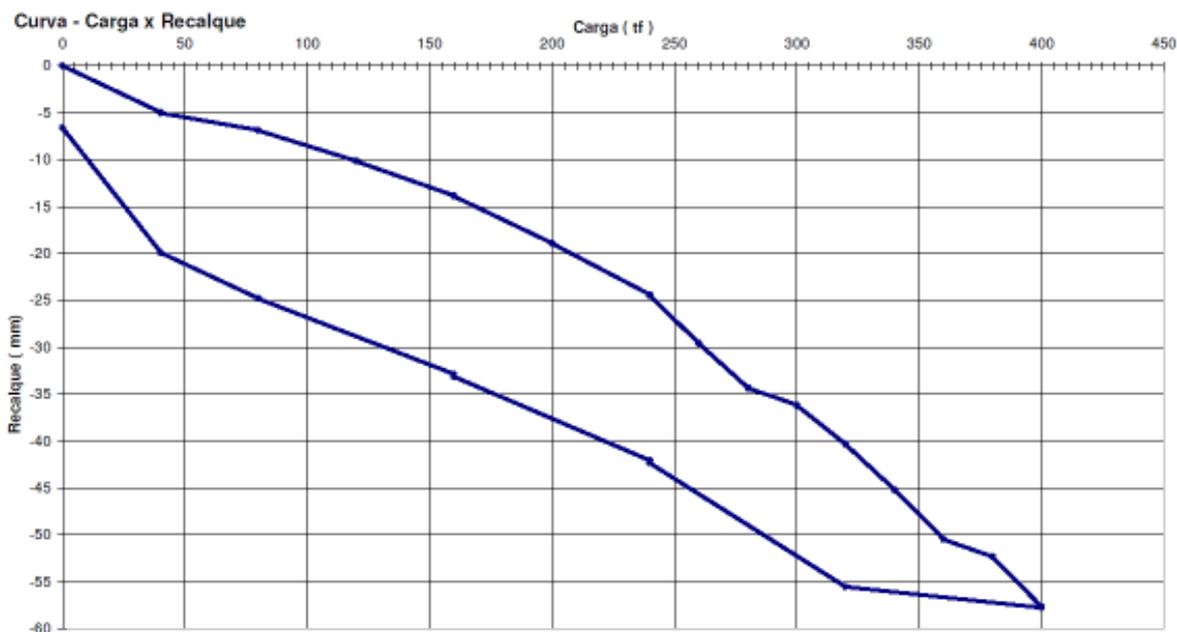


Figura 3: Curva carga x recalque da prova de carga prévia

O método Falconi-Perez que apresentou o menor coeficiente de variação indicou aproximadamente 3600 kN e a prova de carga estática atingiu 4000 kN com deslocamento 57,5 mm. Analisando esses dois dados, com  $FS = 1,6$  e mais a capacidade estrutural admissível do elemento metálico 2160 kN, ficou definido como carga admissível de projeto 2100 kN (210 tf), que corresponde a um deslocamento na curva da prova de carga de 20 mm, considerado adequado para a estrutura.

Portanto o projeto foi desenvolvido com essas diretrizes (figura 4) e a obra foi acompanhada com controle de negas e repiques para garantir comportamento semelhante em todas as estacas.

Durante a cravação das estacas, foram executadas mais três provas de carga estática para avaliação do desempenho.



Figura 4: Projeto de Fundações

### 3. Provas de Carga Estática

Conforme dito anteriormente, foram feitas 4 provas de carga, sendo que uma delas previamente ao projeto (figura 5).

As 3 provas de carga restantes foram executadas durante o estaqueamento com a finalidade de avaliação do desempenho e eventuais ajustes no projeto.

Os comprimentos das estacas das provas de carga estão indicados no perfil geotécnico da figura 2.

Segue abaixo (figura 5) as curvas Carga x Recalque dos 3 ensaios. Em um deles (P21+P22) foi aplicado um método de extrapolação (Van der ween - trecho em vermelho), pois o ensaio foi interrompido precocemente.

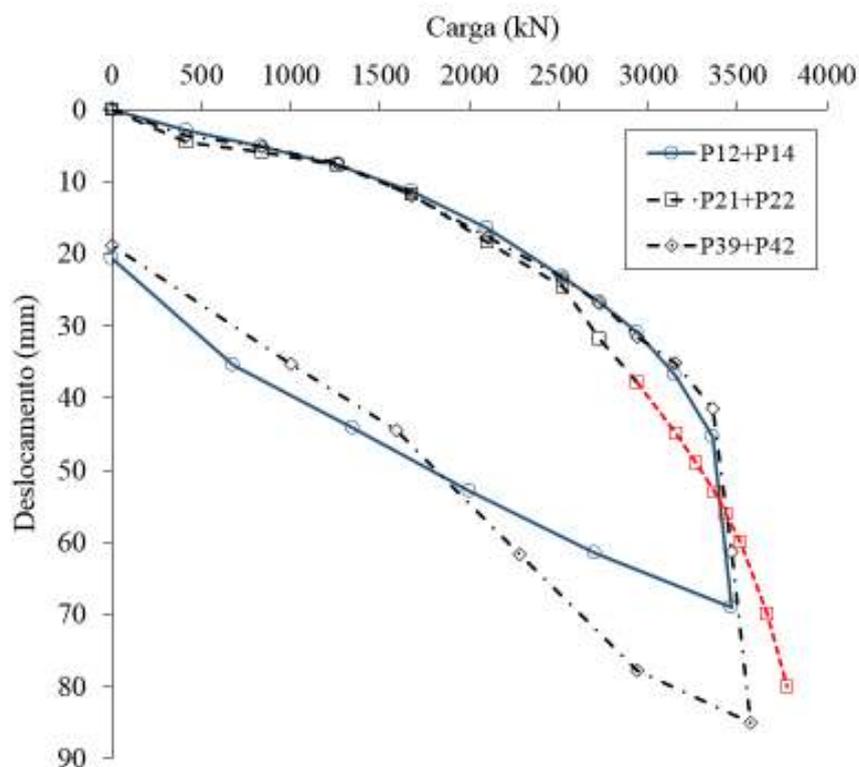


Figura 5: Curvas Carga x Recalque das provas de carga estáticas.

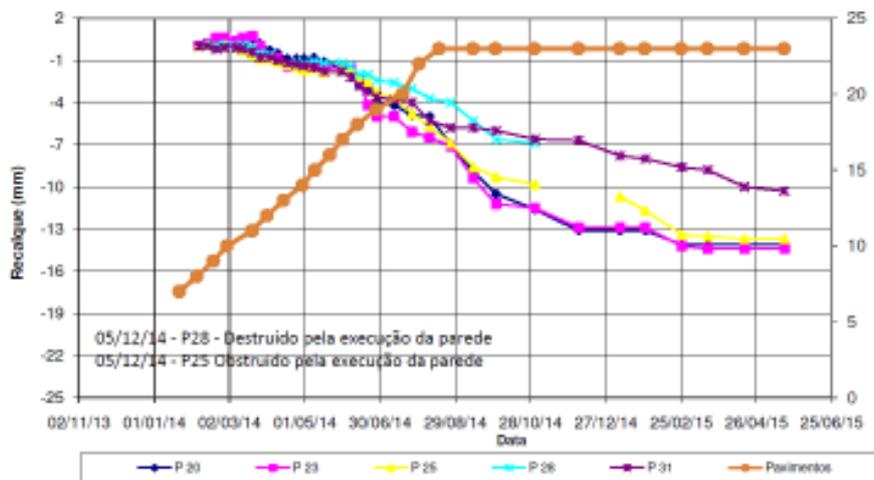
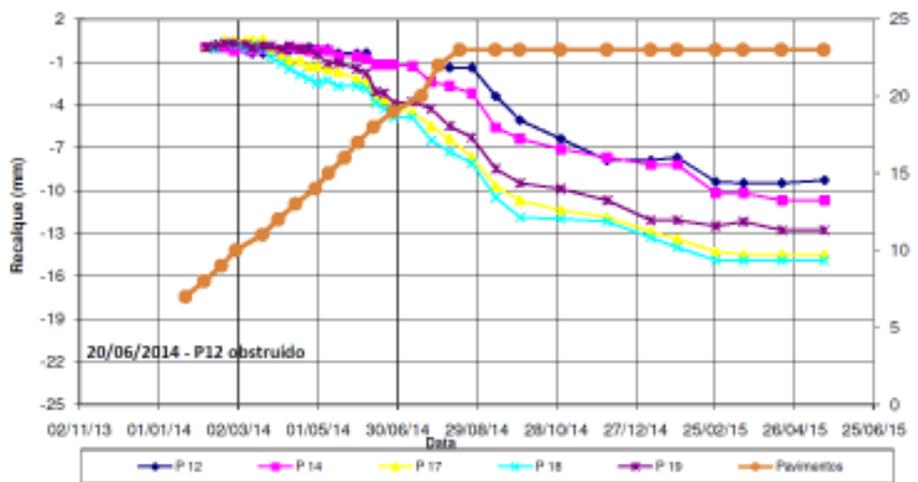
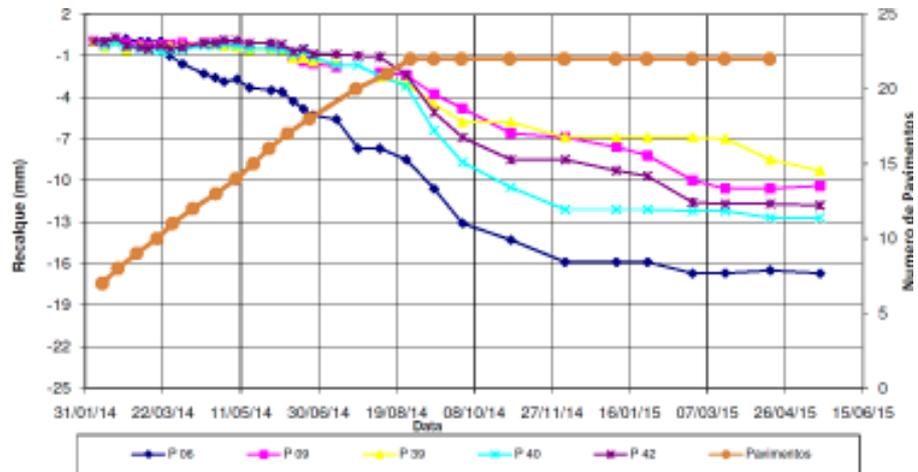
É possível observar nas curvas que até 2500 kN o comportamento das 3 estacas é praticamente o mesmo, e a partir daí até 3500 kN com exceção da curva extrapolada as curvas são coincidentes. Ou seja, pode-se concluir que não há problemas de recalques diferenciais entre pilares.

### 4. Controle de Recalques

Com a revisão de 2010 da norma de fundações NBR6122, o controle de recalques se tornou obrigatório em edifícios com mais de 60 m de altura.

Foram instalados pinos de recalque em 17 pilares, escolhidos estrategicamente de tal forma que possibilitasse a comparação com os deslocamentos obtidos nas provas de carga e também uma ideia dos recalques em vários pontos do edifício.

A leitura dos recalques teve início quando a estrutura estava entre a quinta e a sétima lajes, dependendo da região da obra. A estrutura foi concluída 7 meses depois mas as leituras seguiram até a conclusão da obra, 18 meses depois, quando já se observava a estabilização dos recalques (figura 6).



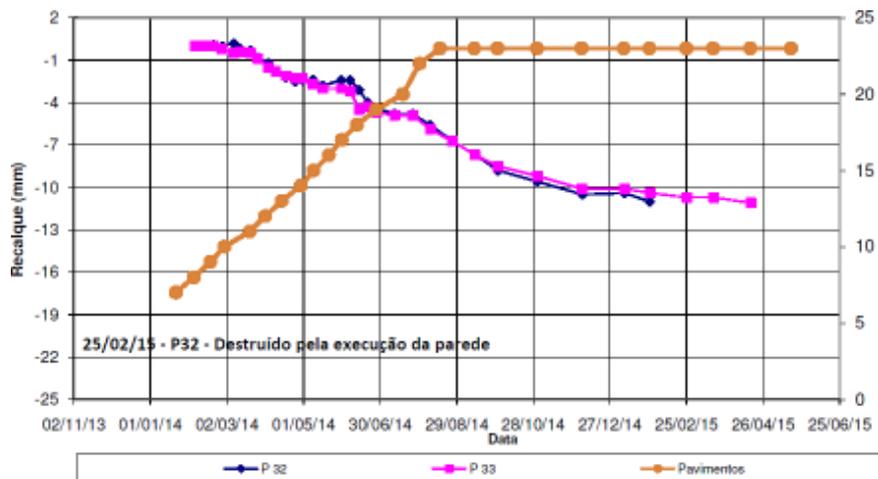


Figura 6: Controle de recalques

## 5. Coeficiente de Reação Vertical

Com essas leituras finais de recalque em cada pilar, é possível estimar o coeficiente de reação vertical dessa fundação dividindo a carga permanente do pilar pelo valor do respectivo recalque.

Em uma primeira tentativa de estabelecer uma relação desse coeficiente com alguma variável que tenha impacto relevante nesse valor, os pilares foram divididos em função dos números de estacas em cada bloco (tabelas 1 e 2).

Tabela 2: Coeficientes de reação vertical

Pilar	Nº de estacas	Deslocamento medido (cm)	Carga do Pilar (tf)	Comprimento (cm)	Kv (tf/cm)
P40	3	1,27	540	4000	425,2
P6	5	1,67	890	4300	532,9
P9	6	1,04	1080	4300	1038,5
P19	6	1,28	1160	4050	906,3
P20	6	1,41	1160	4230	822,7
P23	6	1,44	1110	4550	770,8
P31	6	1,03	990	4600	961,2
P17 (+ P18)	10	1,45	1880	4370	1296,6
P18 (+ P17)	10	1,49	1880	4370	1261,7
P25 (+ P26)	10	1,37	1780	4420	1299,3
P42 (+ P39)	11	1,18	1650	3790	1398,3
P39 (+ P42)	11	0,93	1650	3790	1774,2
P33 (+ P34)	12	1,11	1650	4600	1486,5
P12 (+ P14)	14	0,93	1850	3900	1989,2
P14 (+ P12)	14	1,07	1850	3900	1729,0

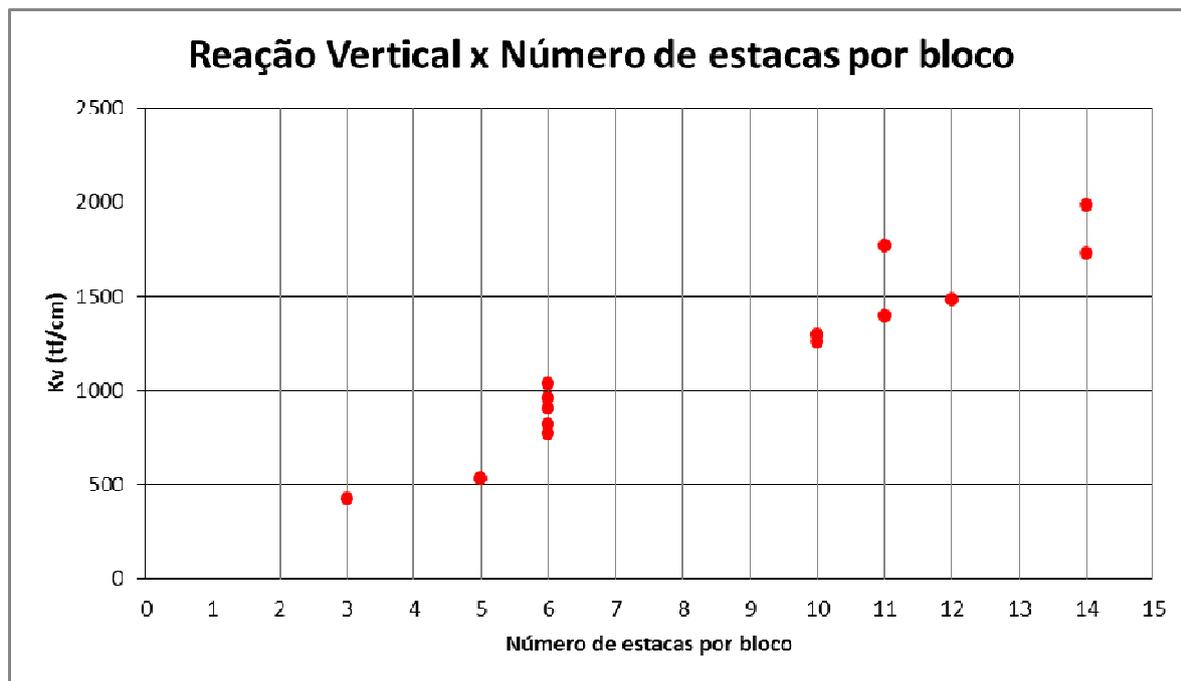


Figura 7: Coeficientes de Reação Vertical x número de estacas por bloco

Observa-se que os valores obtidos indicam uma tendência ascendente na relação com o número de estacas no bloco como era de se esperar.

Foram obtidos valores com diferença de até 4 vezes entre blocos de 4 estacas e de 14 estacas.

Foi feita tentativa separando os blocos por região de sondagens representativas, com os seguintes resultados (tabela 3), neste caso com uma dispersão muito errática..

Tabela 3: Coeficiente Reação Vertical por região de sondagens representativa.

Pilar	Nº de estacas	Deslocamento medido (cm)	Carga do Pilar (tf)	Comprimento (cm)	Kv (tf/cm³)	Região	Sondagem Referência
P40	3	1,27	540	4000	425,2	1	SP-4, SP-6A, SP-7
P6	5	1,67	890	4300	532,9	1	SP-4, SP-6A, SP-7
P9	6	1,04	1080	4300	1038,5	1	SP-4, SP-6A, SP-7
P19	6	1,28	1160	4050	906,3	2	SP-2, SP-6, SP-9
P20	6	1,41	1160	4230	822,7	3	SM-5, SP-6
P23	6	1,44	1110	4550	770,8	3	SM-5, SP-6
P31	6	1,03	990	4600	961,2	3	SM-5, SP-6
P17 (+ P18)	10	1,45	1880	4370	1296,6	2	SP-2, SP-6, SP-9
P18 (+ P17)	10	1,49	1880	4370	1261,7	2	SP-2, SP-6, SP-9
P25 (+ P26)	10	1,37	1780	4420	1299,3	3	SM-5, SP-6
P42 (+ P39)	11	1,18	1650	3790	1398,3	1	SP-4, SP-6A, SP-7
P39 (+ P42)	11	0,93	1650	3790	1774,2	1	SP-4, SP-6A, SP-7
P33 (+ P34)	12	1,11	1650	4600	1486,5	4	SM-5
P12 (+ P14)	14	0,93	1850	3900	1989,2	2	SP-2, SP-6, SP-9
P14 (+ P12)	14	1,07	1850	3900	1729,0	2	SP-2, SP-6, SP-9

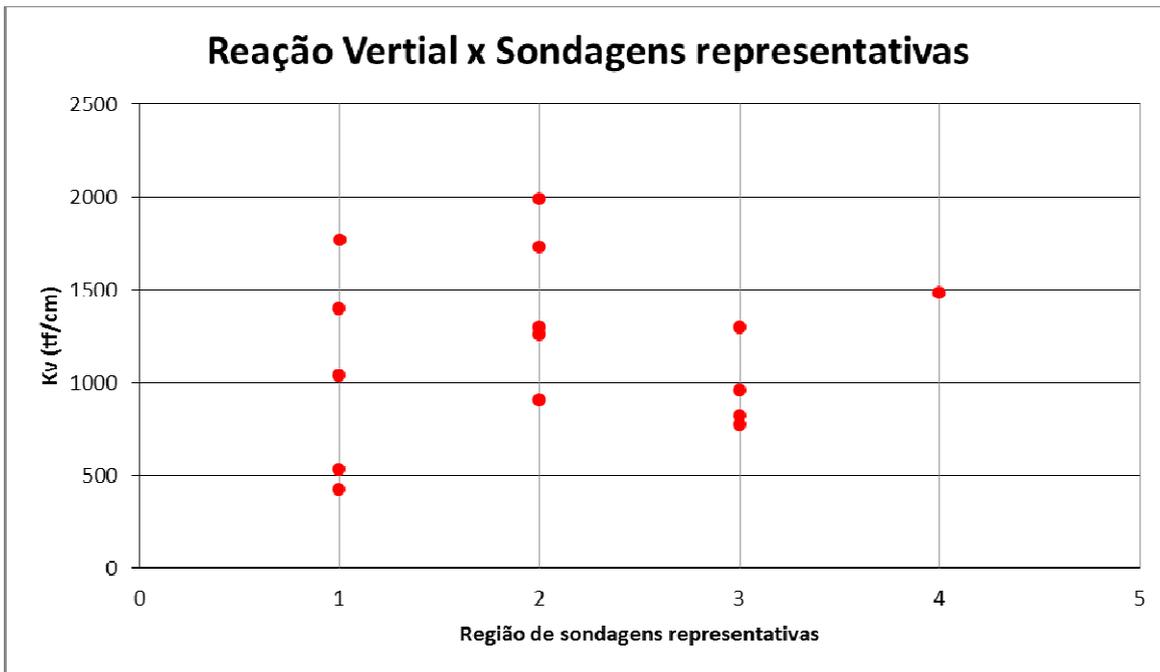
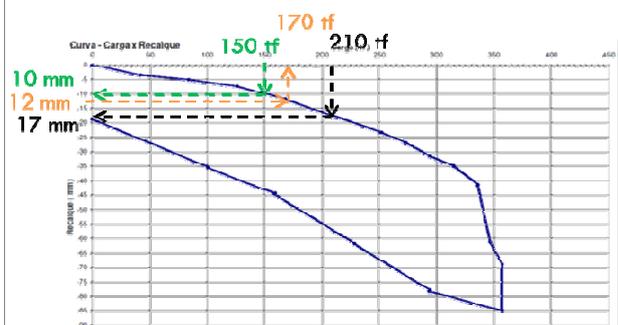
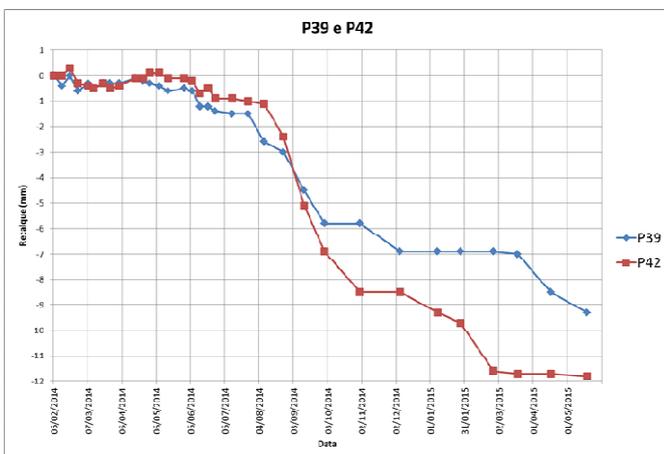


Figura 8: Coeficientes de Reação Vertical x Sondagens representativas.

#### 4. Conclusão

Analisando os valores e as tentativas de se obter uma correlação do coeficiente de reação vertical com uma das variáveis indicadas observa-se uma distribuição ainda pouco consistente nos dois casos exemplificados acima. Ainda há variáveis a serem estudadas em trabalhos futuros como, por exemplo, a ordem de grandeza das cargas nos pilares.

É importante ressaltar que nesse caso específico, as provas de carga executadas durante o estaqueamento confirmaram a carga admissível adotada e os recalques medidos são compatíveis com os deslocamentos medidos nas provas de carga no carregamento permanente real de cada pilar (figura 9), o que indica que nesse caso, os recalques não tem influência do efeito de grupo de estacas.



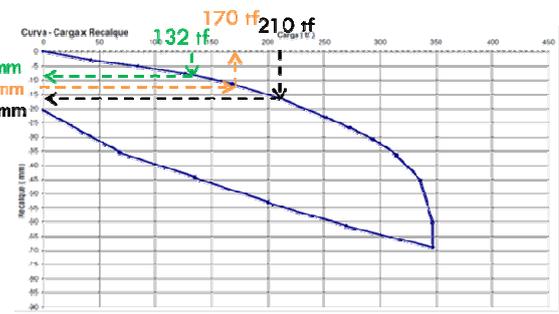
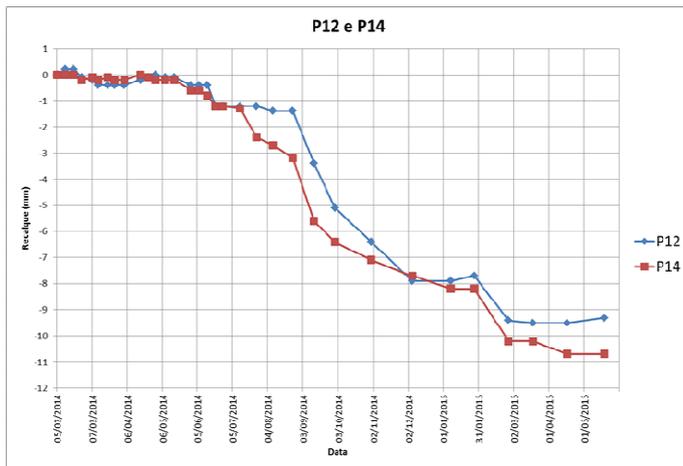


Figura 9: Comparação dos recalques com deslocamentos das provas de carga