

Análise da curva carga-recalque de um edifício residencial em estacas hélice contínua da cidade do Recife

Danilo Silva dos Santos

Mestrando, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, danilosilva.ssd@gmail.com

Alexandre Duarte Gusmão

Professor, Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil, alexandreduarteagusmao@gmail.com

Raíza Silva Bezerra

Mestranda, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, rbraizabezerra@gmail.com

Ramon Duque Ferraz Burgos

Mestrando, Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil, rdfb@poli.br

Sílvio Romero de Melo Ferreira

Professor, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, sr.mf@hotmail.com

Gilmar de Brito Maia

Engenheiro, Gusmão Engenheiros Associados Ltda., Recife, Brasil, gilmar@gusmao.eng.br

RESUMO: Uma das principais formas de determinação do recalque de fundações profundas é a partir do conhecimento da curva carga-recalque resultante de uma prova de carga estática. No entanto, a prova de carga estática não quantifica o efeito de grupo no recalque, ou seja, quando as estacas são simultaneamente solicitadas. O objetivo desse trabalho é comparar o valor do recalque de uma estaca isolada com o recalque do grupo de estacas de um edifício residencial da cidade do Recife. A estrutura do edifício é em concreto armado, possuindo 41 níveis de laje e a solução de fundações para a lâmina é em estacas tipo hélice contínua de 600 e 700 mm. O efeito de grupo a cada estágio de medição é calculado como a razão entre o recalque total da lâmina do edifício e o recalque de uma estaca avaliada por sua curva carga-recalque. Os resultados mostram que o recalque médio do grupo de estacas é cerca de 12 vezes maior que o de uma estaca isolada. Esses resultados revelam que é um equívoco considerar que a curva carga-recalque da prova de carga indica o recalque de todas as estacas, uma vez que isso desconsidera o efeito do grupo.

PALAVRAS-CHAVE: Efeito de grupo, Fundações, Interação solo-estrutura

ABSTRACT: One of the main ways of determining the deep foundations settlement is from the knowledge of the load-settlement curve resulting from a static load test. However, the static load test does not quantify the group effect on the settlement, namely, when the piles are simultaneously requested. The objective of this paper is to compare the value of the settlement of an isolated pile with the settling of the pile group of a residential building in the city of Recife. The building has a reinforced concrete structure with 41 floors, its foundations' solution for the main tower is on 600, and 700 mm Auger cast piles. The group effect at each building settlement stage is calculated as the ratio of the total settlement of the building tower to the settling of a pile given by its load-settlement curve. The results show that the mean settling of the pile group is about 12 times that of an isolated pile. These results reveal that it is a mistake to consider that the load-settlement curve of the load test indicates the settlement of all the piles, since this disregards the effect of the group.

KEYWORDS: Group Effect, Foundation, Soil-structure interaction

1 Introdução

Em projetos de engenharia, três requisitos técnicos que devem ser atendidos. São eles: o estado limite último (ELU), o estado limite de serviço (ELS) e durabilidade dos elementos. Dentre esses requisitos, na área de fundações, a maior parte das patologias estão associados ao ELS, uma vez que a estrutura não foi dimensionada para os esforços adicionais causados por deslocamentos excessivos. Dessa forma, se torna essencial conhecer o desempenho das fundações de um edifício.

Além disso, toda obra de engenharia possui recalque, pois ele é necessário para que se haja qualquer mobilização de resistência. O recalque pode ser obtido através de fórmulas teóricas, ensaios de provas de carga estáticas nas estacas da obra ou ainda aferido usando técnicas de instrumentação de edifícios.

No entanto, em um ensaio de prova de carga estática a aplicação de carga no ensaio se dá em uma estaca isolada. Assim, a curva resultante do ensaio retrata uma situação não interferência mútua entre as estacas. Apesar disso, durante a vida útil do edifício, todas as estacas serão solicitadas simultaneamente, ocorrendo a interação dos elementos de fundação uma sobre a outra com superposição de tensões. Isso acontece sobretudo em quando o solo abaixo da cota de assentamento das estacas forem compressíveis, e a este fenômeno de sobreposições de tensões dá-se o nome de “efeito de grupo”. Sua reprodução é apresentada na Figura 1.



Figura 1. Interferência mútua causada por bulbo de tensões de estacas próximas

À vista disso, o objetivo deste artigo é avaliar o efeito de grupo em um edifício residencial, através da comparação do desempenho de uma estaca isoladas, dado o ensaio de prova de carga estática, com o desempenho das estacas do edifício trabalhando simultaneamente como um grupo de estacas, dado por resultados de medições de recalques.

Dessa forma, será possível entender se os parâmetros de distâncias entre estacas recomendadas pela NBR 6122 (ABNT, 2010), em função do seu tipo e diâmetro, de fato produz uma situação de não sobreposição de bulbos de tensões.

2 Fundamentação teórica

A NBR 6122 (ABNT, 2010), diz que o espaçamento mínimo entre estacas ou tubulões deve levar em consideração a forma de transferência de carga ao solo e o efeito do processo executivo nas estacas adjacentes, no entanto não especifica como essa consideração deve ser realizada. No entanto ela não especifica as distâncias entre estacas recomendadas em função do seu tipo e diâmetro, para não produzir uma situação de não sobreposição de bulbos de tensões.

O trabalho publicado por Almeida et al. (2018) analisou oito edifícios residenciais da cidade do Recife de 27 a 42 pavimentos, desses, três possuíam solução de fundações em estacas metálicas e cinco em estacas hélice contínua. Eles notaram que o comportamento da relação estaca grupo-isolada para os prédios em estruturas metálicas era adequado, essa relação girava em torno de um. Eles justificam que isso ocorre pois o terreno em que essas estacas se apoiam possui pouca deformabilidade. Já os edifícios construídos sobre

estacas hélice contínuas a relação estaca grupo-isolada girou entre 2 e 9, ou seja, o recalque do grupo de estacas de todo o edifício foi em até 9 vezes maior que o de uma estaca isolada no ensaio de prova de carga estática.

3 Caracterização da obra e do terreno de fundação

O caso de obra estudado trata-se de um prédio em estrutura aporricada construído no bairro Torre na cidade do Recife, Pernambuco. Ele conta com 41 níveis de laje, sendo 37 pavimentos tipo e 17 pilares em sua lâmina com cargas máximas entre 5.250,80 kN e 20.559,20 kN. A periferia é composta por 160 pilares com cargas de no máximo 1.330,00 kN.

As sondagens realizadas indicam que o terreno é composto predominantemente por uma camadas de solo arenoso de compactidade mediana compacto. As estacas se apoiam em solo arenoso muito compacto. O perfil de sondagem é apresentado na Figura 2, onde pode-se observar tanto a estratigrafia quanto o valor do N_{SPT} a cada metro.

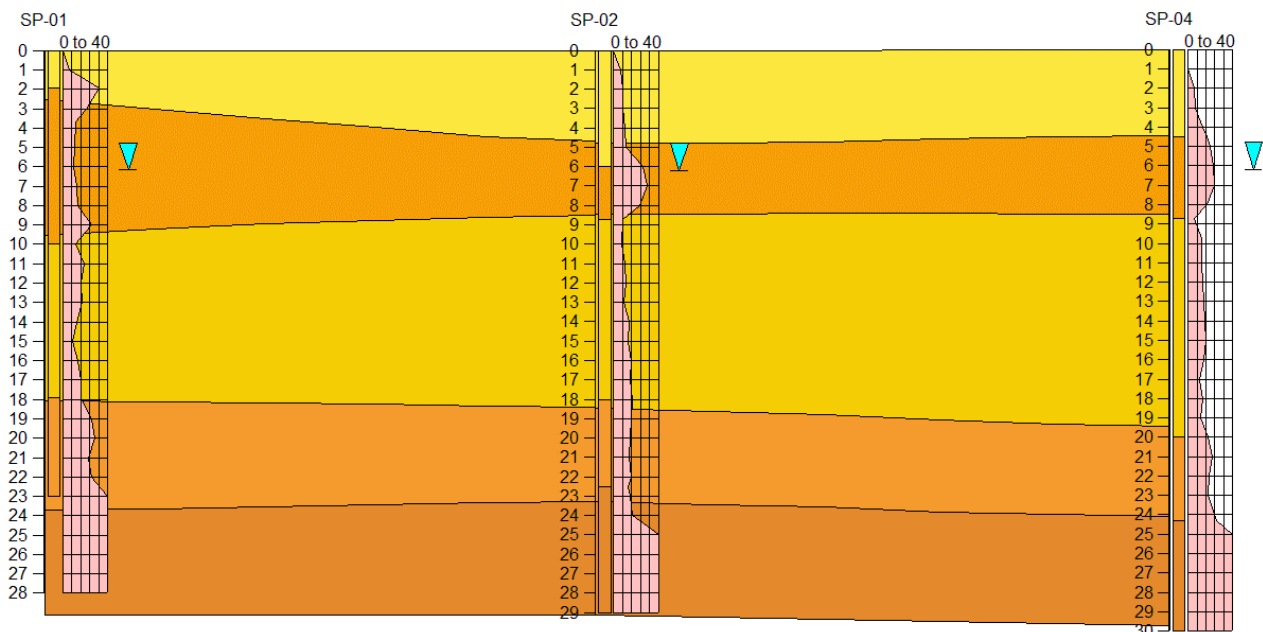


Figura 2. Perfil do terreno sob região da torre.

Superficialmente o terreno é composto por uma camada de areia fina a média pouco compacta. Após essa camada é notada a presença de uma camada entre medianamente compacta à compacta de areia fina siltosa. Em seguida as sondagens indicam a presença de mais uma camada de areia fina compacta e sendo esta seguida por uma camada de silte arenoso medianamente compacto. Finalmente a sondagem parou em uma camada de areia média e fina muito compacta. O nível d'água varia entre as cotas -6,15 e - 6,30.

A solução de fundações de projeto da torre do edifício foi em estacas de concreto armado do tipo hélice contínua, com diâmetros de 600 mm e 700 mm, e com comprimentos de 23,50 m e 24,50 m respectivamente.

4 Metodologia

A metodologia consistiu na avaliação e interpretação das sondagens realizadas, dos relatórios de provas de carga, das leituras de medições de recalques e em estimativas de carregamento no momento dessas leituras.

As leituras de medições de recalques foram medidos em um período de 778 dias com auxílio da estação total ao junto à construção do edifício. Assim como o trabalho de Almeida et al. (2018), este trabalho admitiu o bloco de coroamento rígido, assim os recalques dos pilares representam integralmente os recalques das estacas. Dessa forma, a partir dos resultados das medições de recalque do edifício, foi estimado os

recalques médios em cada estaca em função da porcentagem do carregamento atuante com a Equação (1). Esse valor foi denominado Recalque médio da lâmina (RML).

$$Q_{EST.} = q (\%) \times \frac{\sum Q_{PILAR}}{N^{\circ} \text{ estacas}} \quad (1)$$

Onde Q_{PILAR} é o somatório das cargas em todos os pilares da torre; e N° estacas é o número de estacas da torre. Mesmo em meio a redistribuição dos esforços dos pilares, pode-se tomar o valor do recalque médio, pois este não é influenciado pela interação solo estrutura. (GUSMÃO, 1990).

A partir dos dois ensaios de prova de carga estáticas realizados, foi possível realizar a extrapolação da curvas carga-recalque média das estacas ensaiadas. O método de extrapolação utilizado foi o consagrado método de Van der Veen (1953). Este método segue a seguinte Equação:

$$Q = Q_{ULT.} (1 - e^{-\alpha w}) \quad (2)$$

De posse dos parâmetros da equação da curva, foi possível estimar os valores de recalques na estaca isolada em função da situação do carregamento. Este valor foi denominado Recalque da Estaca Isolada (REI).

Por fim, a relação estaca grupo-isolada, aqui chamado de Fator de Efeito de Grupo (FEG) é definido como a razão entre o Recalque médio da lâmina (RML), ou seja, o recalque de todo o grupo de estacas, e o Recalque da Estaca Isolada (REI). Essa expressão é apresentada na Equação (3).

$$FEG = \frac{RML}{REI} \quad (3)$$

Um resumo da metodologia adotada neste trabalho está exibida na Figura 3.

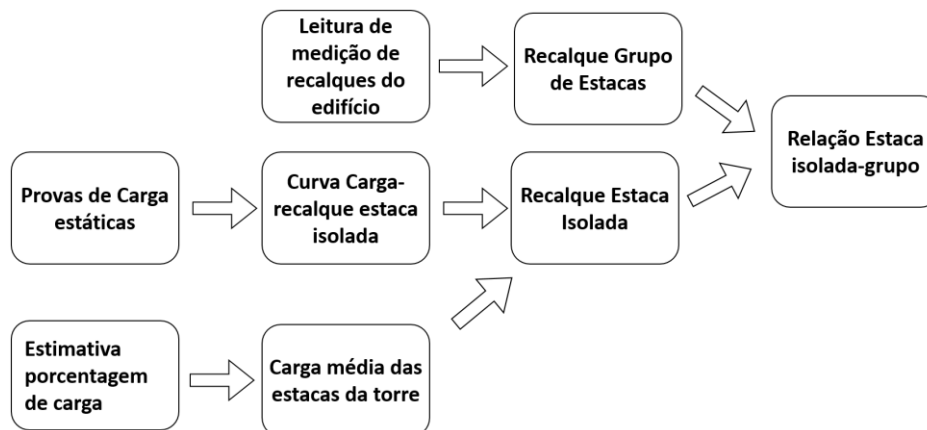


Figura 3. Resumo da metodologia utilizada nesse artigo

5 Resultados

5.1 Provas de carga estáticas

Foram realizadas duas provas de carga nas estacas sob a lâmina do edifício de 700 mm de diâmetro e com 2.400 kN de carga de trabalho. As suas respectivas curvas carga-recalques são apresentadas na Figura 4.

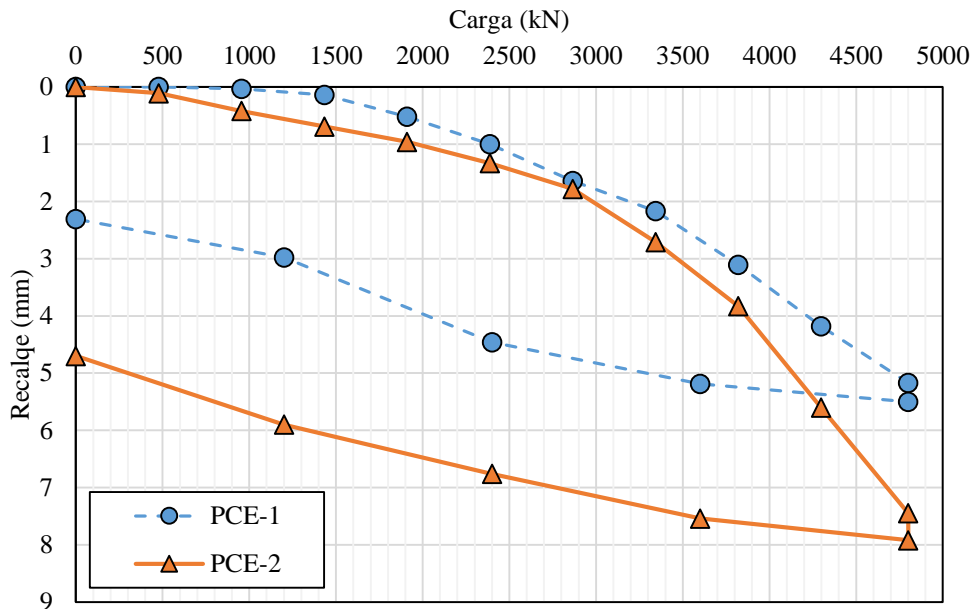


Figura 4. Provas de carga realizadas.

O modelo de ajuste de Van der Veen (1953) apresentou os seguintes parâmetros: carga última (ou carga de ruptura) $Q_{ULT.} = 5150$ kN e $\alpha = 0,4110$. Com um valor de $R^2 = 0,9891$. A Figura 5 apresenta os pontos da média entre as provas de carga e a curva de extrapolação.

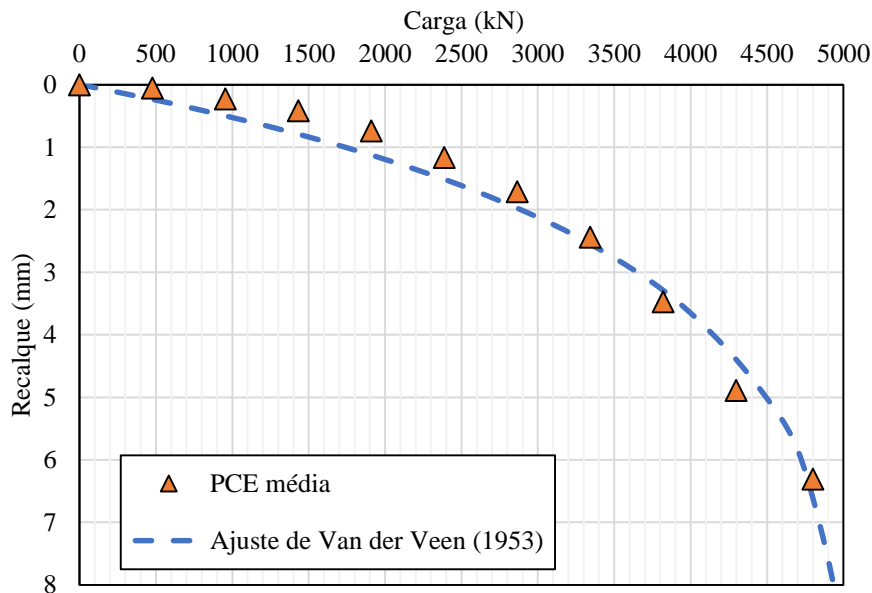


Figura 5. Prova de carga média e curva de extrapolação de Van der Veen (1953).

5.2 Evolução do carregamento e medição de recalques

A Figura 6 mostra a evolução da estimativa do carregamento da estrutura, bem como o recalque dos pilares P4 e P15, pilares mais e menos carregados respectivamente, e o valor de RML em função do tempo de andamento da obra.

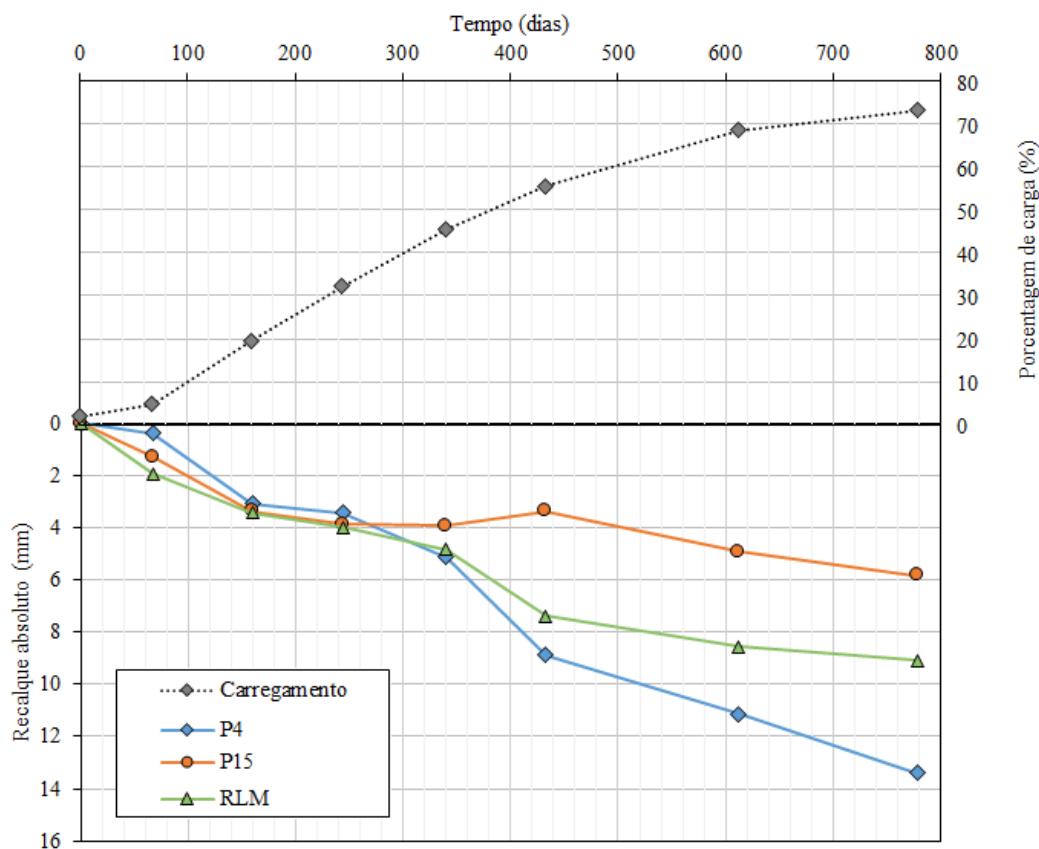


Figura 6. Evolução do carregamento e dos recalques em função do decorrer da obra.

Na Tabela 1 estão registrados os valores dos recalques de cada pilar da torre do edifício a cada estágio de leitura dos recalques. Na última linha é encontrado o valor do recalque médio da lâmina (RML) a cada leitura.

Tabela 1. Valores de medição de recalques nas oito leituras.

Pilar	Recalques							
	R. L1 (mm)	R. L2 (mm)	R. L3 (mm)	R. L4 (mm)	R. L5 (mm)	R. L6 (mm)	R. L7 (mm)	R. L8 (mm)
P1	0,81	2,42	4,91	5,43	5,46	5,00	7,00	11,35*
P2	0,61	1,96	3,38	4,10	5,79	7,20	9,19	9,63
P3	0,38	1,32	3,17	3,65	4,43	7,88	8,71	9,27
P4	0,00	0,38	3,08	3,43	5,12*	8,89	14,49	13,40
P5	0,98	2,77	4,09	4,87	5,66	9,57	10,58	10,94
P6	0,54	1,81	2,92	3,91	5,37	6,84	9,55*	9,45*
P7	0,63	2,30	2,92	3,85*	4,70*	8,83	9,05*	9,30*
P8	1,00	2,49	3,12	3,35	3,68	8,05	8,81	9,67
P9	0,99	2,55	3,77	4,04	4,93	9,18	10,62	10,50*
P10	0,92	2,68	3,88	4,84	6,28	7,60*	9,20*	9,40*
P11	0,71	2,14	3,75	4,44	4,86	8,61	9,41	9,20*
P12	0,88	2,34	3,03	3,53	4,04	8,05	8,60	9,35
P13	1,11	2,66	3,53	3,53	4,78	8,69	10,08	11,05
P14	0,17	0,86	3,15	3,51	3,67	5,55	7,03	7,63
P15	0,35	1,28	3,38	3,85	3,91	3,37	4,92	5,84
P16	0,66	1,92	3,08	3,63	4,94	6,39	8,66	9,31
P17	0,06	0,71	3,08	3,65	4,53	5,11	7,57	8,15
Req. Médio da Lâmina	0,63	1,92	3,43	3,98	4,83	7,34	8,83	9,61

Onde os valores com o símbolo (*) foram interpolados com auxílio da medição de recalque pilares próximos.

A Figura 7 apresenta um mapa de isolinhas de recalque referentes à 8ª medição (última leitura) que foi realizada 778 dias após a 1ª medição.

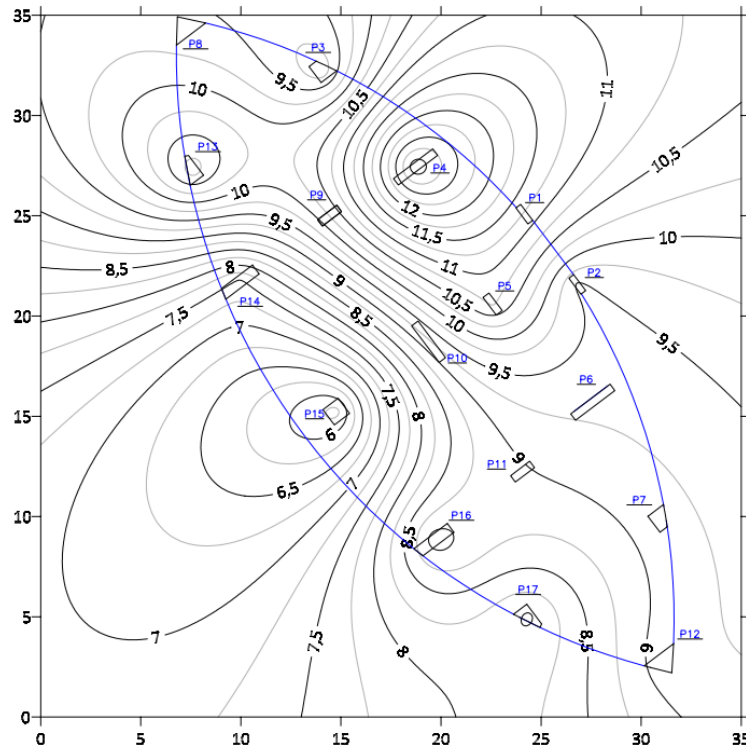


Figura 7. Curvas de isolinhas na última leitura.

5.3 Relação Estaca Grupo-Isolada

De posse dos parâmetros da curva carga recalque (Q_{ULT} e α) pôde-se encontrar os recalques da estaca isolada (REI) para cada estágio de carregamento/leitura. Esses valores estão expostos na Tabela 2, bem como o valor calculado do Fator de Efeito de Grupo.

Tabela 2. Valores de efeito de grupo a cada leitura de recalques

Leitura	Carga (%)	Carga Total (kN)	Carga Média por estaca (kN)	RML (mm)	REI (mm)	Fator de efeito de grupo
L1	1,95	4.437,19	36,67	0,63	0,02	36,52
L2	4,88	11.092,99	91,68	1,92	0,04	43,87
L3	19,59	44.538,34	368,09	3,43	0,18	18,99
L4	32,27	73.380,11	606,45	3,98	0,30	13,05
L5	45,37	103.164,78	852,60	4,83	0,44	10,97
L6	55,49	126.182,73	1042,83	7,34	0,55	13,34
L7	68,44	155.634,61	1286,24	8,83	0,70	12,63
L8	72,97	165.943,79	1371,44	9,61	0,75	12,76

A partir desses dados pode-se construir as curvas carga-recalque do edifício e da estaca isolada. A curva do edifício é dado pelos valores de carga média das estacas e o valores de recalques total médio da lâmina. Enquanto a curva para a estaca isolada é a carga média da estaca e o valor de REI, dado pelo ajuste de Van der Veen. E a Figura 9 mostra a evolução do Fator de efeito de grupo com a evolução dos carregamentos.

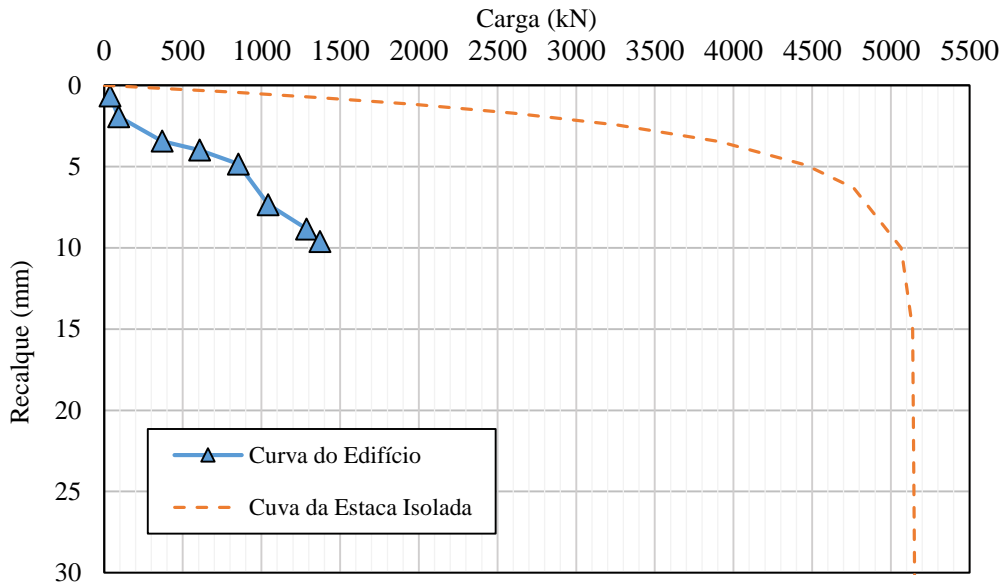


Figura 8. Efeito de grupo do recalque do edifício e de uma estaca isolada dada pela PCE.

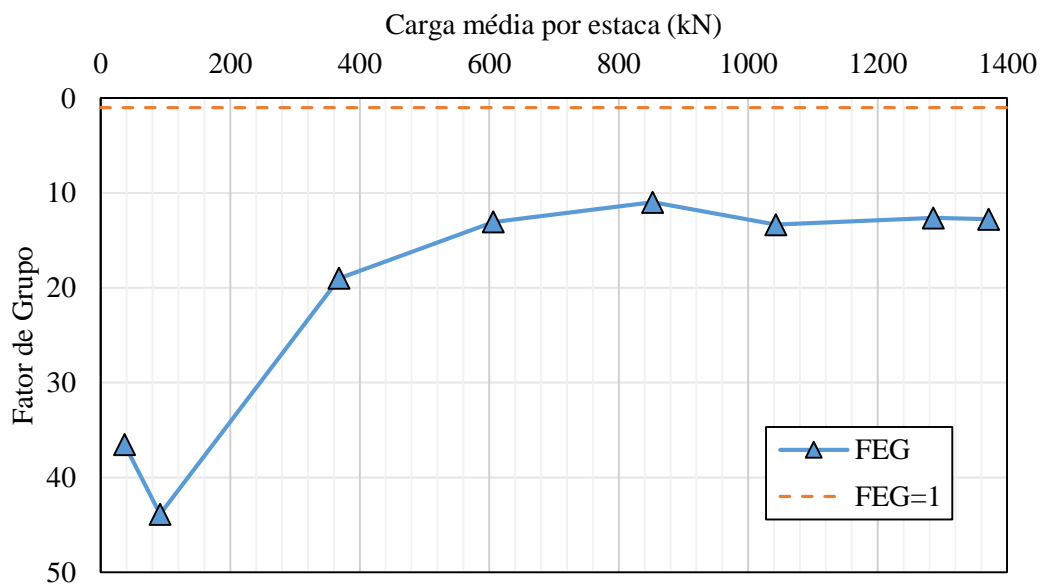


Figura 9. Fator de grupo em função do carregamento atuante.

Podemos observar que este valor tende a se tornar uniforme a partir do terceiro estágio de carregamento onde apenas 20% da porcentagem total do carregamento da obra está aplicado. A média entre os últimos cinco estágios de carregamento é 12,55; e este é considerado o Fator de Efeito de Grupo da obra.

5 Conclusões e considerações finais

Com os resultados obtidos com o presente estudo ficou comprovada a disparidade entre o comportamento de uma estaca isolada e o grupo na qual ela está inserida. Na obra analisada o recalque do grupo de estacas de toda a torre foi cerca de 16 superior ao das estacas ensaiadas do próprio edifício.

Esse fenômeno é explicado pela mútua interação e superposição de tensões que ocorrem quando as 121 estacas da obra são solicitadas simultaneamente sobre um solo deformável. E cada uma dessas estacas possui fatores executivos que podem contribuir para seu variado comportamento.

Dessa forma, a menos que as estacas estejam apoiadas sobre um extrato considerado indeslocável, é um equívoco ponderar que o recalque do edifício será idêntico ao recalque dado na prova de carga estática.

Por fim, é importante atentar que as conclusões aqui obtidas só foram possíveis graças a verificação do desempenho da fundação do edifício a partir da instrumentação de edifícios através da monitoração de recalques.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio do escritório de projetos Gusmão Engenheiros Associados Ltda. pela disponibilização dos projetos executivos e medições de recalques que possibilitaram a realização desse trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010). NBR 6122. *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.

Almeida, A. K. L de; Oliveira, P. E. S. de; Amorim, M. D.; Roma, R. F.; Oliveira, M. S. de; Maia, G. de B.; Gusmão, A. D. (2018) *Análise do Efeito de Grupo em Elementos de Fundação Profunda de Edifícios*. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG, 19, 2018, Salvador. Anais... Salvador: ABMS. v. 1.

Gusmão, A. D. (1990) *Estudo da interação solo-estrutura e sua influência em recalques de edificações*. Dissertação de Mestrado, Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal Rio de Janeiro – UFRJ/COPPE, 165p.

Van der Veen, C. (1953). *The Bearing Capacity of a Pile*. In: 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Zurich, No. 2, pp. 84-90.