

## Análise do Efeito de Grupo em Fundações Profundas Através do Comparativo da Prova de Carga Estática com a Medição de Recalques de Edifícios em Recife/PE e Salvador/BA

Allan Kleber Leite de Almeida

Universidade Católica de Pernambuco, Recife, Brasil, [allan92leite@gmail.com](mailto:allan92leite@gmail.com)

Pedro Eugênio Silva de Oliveira

Universidade Católica de Pernambuco, Recife, Brasil, [pedrocivil@hotmail.com](mailto:pedrocivil@hotmail.com)

Alexandre Duarte Gusmão

Universidade de Pernambuco, Gusmão Engenheiros Associados, Recife, Brasil, [gusmao.alex@ig.com.br](mailto:gusmao.alex@ig.com.br)

Gilmar de Brito Maia

Gusmão Engenheiros Associados Ltda, Recife, Brasil, [gilmar@gusmao.eng.br](mailto:gilmar@gusmao.eng.br)

**RESUMO:** O avanço do controle de qualidade de projetos tem proporcionado a aplicação de experimentos em tamanho real, fazendo entender o desempenho das estruturas no cotidiano da engenharia geotécnica. Esse trabalho apresenta a comparação das provas de cargas estática com o monitoramento de recalque durante a construção de edifícios em Recife-PE e Salvador-BA. As fundações profundas são do tipo hélice contínua e metálica, com comprimento variando entre 16 a 29 m e 22 a 50 m, respectivamente. As medições apresentaram recalques médios entre 2,61 e 18,20 mm nas estacas hélice contínua e 6,07 e 20,24 mm nas metálicas. A analogia da prova de carga com o monitoramento de recalque compara os diagramas de carga-recalque das estacas antes e após o erguimento da superestrutura, permitindo comparar a magnitude dos recalques para mesma intensidade de carga por estaca. Deste modo, permitiu-se determinar a igualdade ou divergência da magnitude dos recalques, e com isso, pode-se mensurar o efeito de grupo. As estacas hélices contínuas apresentaram um fator de grupo médio de 6 e coeficiente de variação de 55%, e as estacas metálicas obtiveram um fator de grupo de 2 e coeficiente de variação de 31%.

**PALAVRAS-CHAVE:** Monitoramento de recalque de pilares, prova de carga estática, recalque isolado, recalque do grupo, fator de grupo, diagrama carga-recalque, controle de qualidade de projeto.

**ABSTRACT:** The advance of the quality control of projects has provided the application of experiments in real size, making understand the performance of the structures in the daily of the geotechnical engineering. This work presents the comparison of the static load tests with the monitoring of repression during the construction of buildings in Recife-PE and Salvador-BA. The deep foundations are of the continuous propeller type and metallic, with average length of the continuous propeller type varying between 16 and 29 m, and the metallic ones of 22 to 50 m. The measurements showed mean settlements between 2.61 and 18.20 mm in the continuous propeller stakes and 6.07 and 20.24 mm in the metallic ones. The analogy of the load test with the monitoring of repression compares the load-rebound patterns of the stakes before and after the erection of the superstructure, allowing comparing the magnitude of the reloads to the same intensity of load per stake. In this way, it was possible to determine the equality or divergence of the magnitude of the settlements, and with this, one can measure the group group effect. The continuous propeller stakes had a mean group factor of six and coefficient of variation of 55%, and the metal stakes obtained a group factor of two and coefficient of variation of 31%.

**KEYWORDS:** Pillar balancing monitoring, static load testing, isolated set-up, group set-up, group factor, load-set-up diagram, project quality control.

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o controle de qualidade de fundações está proporcionando a experimentos de tamanho real, e ainda, poder compará-los para compreender os efeitos da interação do solo-estrutura. Os controles verificam a qualidade dos materiais empregados, a integridade dos elementos de fundação, a capacidade estrutural interna e externa das estacas, e o desempenho dos pilares quanto ao tipo de uso a qual esta submetido a estrutura.

A verificação da capacidade estrutural das estacas é conferida através do ensaio de prova de carga estática, o qual é responsável pela liberação da fundação para concretagem dos blocos de coroamento, cintas de travamento e em seguida levantamento da superestrutura. O estado limite de serviço da fundação é conferido através do acompanhamento de recalque dos pilares a medida do ritmo construtivo da obra.

Para desenvolvimento deste trabalho, os autores organizaram um banco de dados de edifícios em que foram realizadas provas de carga estática e monitoramento de recalque dos pilares ao longo do processo construtivo. Em seguida, foi comparado o desempenho da curva carga-recalque das estacas quando submetida ao carregamento de compressão sob os dois cenários de carga: (i) estaca isolada, determinada através do diagrama carga-recalque expedido pelo ensaio de prova de carga estática; (ii) grupo de estacas, a partir do diagrama carga-recalque concedido pelo acompanhamento de recalque de pilares.

Nesse contexto, este trabalho evidencia o efeito de grupo de fundações profundas de 16 prédios localizados nas cidades de Recife/PE e Salvador/BA através da não conformidade entre as curvas carga-recalque dos controles de qualidade.

## 2 PROJETO DE FUNDAÇÃO PROFUNDA

Geralmente, a carga de trabalho das estacas determinada pelos projetistas é definida a partir de métodos semi-empíricos de capacidade de carga para estaca isolada, devido ao alto custo incorporado na mobilização do maquinário, na confecção da estaca e no suporte técnico para realizar uma prova de carga estática a priori. Sendo assim, o espaçamento usual para projetos de fundação fazem com que a sobreposição dos bulbos de tensão sejam significantes para o efeito de grupo entre os elementos.

Em virtude da heterogeneidade do perfil geotécnico encontrado nas obras, foram optadas por fundações profundas compostas por estacas do tipo hélice contínua e metálica para transferir as cargas da estrutura para o solo. Sob aspecto de resistência das estacas hélice contínua, a trabalhabilidade por atrito lateral não implica, necessariamente, que sua cota de apoio seja sobre camadas indeslocáveis, diferente das situações em que foi empregada estaca do tipo metálica, onde é predominantemente por ponta em razão das espessas camadas de solos moles ao longo dos seus fustes.

## 3 EFEITO DE GRUPO EM ESTACAS

Segundo Tomlinson (1994), a capacidade de carga de um grupo de estacas é, em muitas situações, menor que a soma da capacidade de carga de cada estaca. Meyerhof (1976), citado por Kezdi e Rethati (1988), sugere que a capacidade de carga de um grupo de estacas seja estimada como o menor valor entre a soma da capacidade de carga individual das estacas, e de um bloco com área da base e área lateral igual a superfície lateral do bloco. No entanto, o efeito de grupo pode ou não interferir na carga última do conjunto.

Então, o efeito consiste na interação entre estacas de um determinado conjunto, que, quando solicitada, cada elemento pode transmitir um acréscimo de tensão a uma região em volta do seu perímetro, criando uma zona de estresse que pode ser sobreposta pelo acréscimo de carga de outras estacas. Dessa forma, em razão do tipo de solo, comprimento, espaçamento e tipo de fundação, é possível que a estaca carregada interfira em estacas adjacentes, em outros grupos de estacas, ou ainda, em fundações de estruturas vizinhas, Tomlinson (1994). A Figura 1 apresenta um desenho esquemático da sobreposição de bulbos de tensão gerado por uma estaca isolada e por um grupo de estacas.

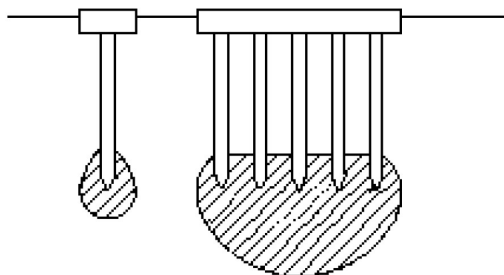


Figura 1. Comparativo entre a geometria do bulbo de tensão de uma estaca isolada e de um grupo de estacas.  
Fonte: Tomlinson (1994).

#### 4 DESEMPENHO DAS FUNDAÇÕES

As fundações, como qualquer outra composição da estrutura, necessitam de garantias de segurança, funcionalidade e durabilidade, sobre a qual finalidade será empregada a estrutura. Nesse sentido, Alonso (1989) propôs que o controle de qualidade de uma fundação deve ser exercido em três frentes principais:

- (i) O controle do material ou dos materiais que compõem os elementos estruturais das fundações;
- (ii) Verificação da carga admissível de projeto através de ensaios dinâmicos e estáticos;
- (iii) Observação do desempenho da fundação a medida em que se vai sendo carregado pela estrutura, para esse controle, são necessárias medidas de recalques e de cargas reais atuantes na fundação.

Dessa forma, o controle executivo da fundação é realizado de maneira conjunta desde a construção das fundações até a entrega e habitação do edifício, pois, o fato de uma fundação ter coeficiente de segurança à ruptura não garante que a mesma tenha um bom desempenho, sendo necessário verificar se os recalques satisfazem as condições de funcionalidade e as cargas atuantes sejam compatíveis com a capacidades de carga do terreno.

##### 4.1 Prova de Carga Estática

Segundo Velloso & Lopes (2010), as provas de carga estática em estacas são realizadas com o objetivo de verificar o comportamento previsto em projeto (capacidade de carga e recalque) e definir a carga de serviço caso não se obtenha previsão do comportamento.

O sistema ação-reação montado para o ensaio é composto por uma estaca comprimida e um grupo de estacas resistindo a tração. Por conseguinte o estado plano de tensões da estaca comprida será similar à de uma estaca isolada, (VELLOSO; LOPES, 2010).

Para este trabalho, as curvas carga-recalque obtidas nos ensaios foram extrapoladas pelo método de Van Der Veen (1953), e estabeleceram as equações e os parâmetros das curvas carga-recalque de uma estaca isolada de cada obra.

##### 4.2 Medição de Recalques

Para verificação do estado limite de serviço em consequência do processo construtivo, solicita-se o monitoramento dos pilares da torre para aferir o recalque médio, a carga média por estaca, e por fim elaborar a curva carga recalque do edifício.

A medição de recalque é feita nivelando-se pontos de referência constituídos por pinos engastados na estrutura, geralmente nos pilares, em relação a uma referência fixa de nível (RN). Os pinos servirão de apoio à mira utilizada no nivelamento, e os mesmos são constituídos de duas partes, a fêmea, que fica fixa a estrutura, e o macho, que é rosqueado apenas para leitura, Gusmão (2006).

Para avaliar o carregamento médio atuante na estrutura e a carga média por estaca, foi admitida a estimativa de carga proposta por Gusmão (2000) para a distribuição de cargas conforme a Tabela 1. As cargas foram estimadas proporcionalmente ao número de pavimentos completados (concreto, alvenaria, revestimentos, pisos, etc) no momento da leitura da cota dos pilares, e a carga por estaca é compreendida como a carga total atuante dividida pelo número de estacas no grupo.

Tabela 1. Distribuição de carga na estrutura segundo Gusmão (2000).

Tipo	Carregamento Parcial (%)*
Estrutura de Concreto Armado	40,00
Alvenarias	20,00
Revestimento Externo	7,50
Revestimento Interno	7,50
Pisos	10,00
Sobrecarga	15,00

(\*) Em relação ao carregamento total da estrutura.

Em função da velocidade de construção são realizadas mais leituras para compor o diagrama carga-recalque da construção do edifício. Os resultados das medições forneceram os recalques, velocidades de recalque, a curva carga-recalque representativa para o grupo de estacas, bem como as suas rigidezes.

## 5 METODOLOGIA

### 5.1. Banco de Dados

Foi contruído um banco de dados de edifícios aporticados de concreto armado com fundação profunda em que foram executadas prova de carga estática e medição de recalque dos pilares durante a construção. Os resultados de ambos controles de qualidade foram avaliados quanto ao tipo de fundação com o objetivo de aferir e interpretar o efeito de grupo gerado pelos elementos das fundações dos edifícios.

A Tabela 2 a seguir apresenta o resumo geral das informações das estruturas e fundações das obras analisadas.

Tabela 2. Resumo do banco de dados construído pelo autor.

Obra	Tipo	Nº de Pto.	Carga de Torre (kN)	Nº de Estacas	Carga Média por Estaca (kN)	Comprimento das Estacas (m)
0113	Hélice Contínua	31	146.850	132	1.110	29
6213	Hélice Contínua	41	201.650	118	1.710	20
12812A	Hélice Contínua	36	223.920	122	1.835	23
12812B	Hélice Contínua	36	223.920	121	1.850	23
12812C	Hélice Contínua	36	221.590	121	1.830	23
13614	Hélice Contínua	26	170.150	170	1.000	25
14313	Hélice Contínua	41	224.490	121	1.820	24
18213	Hélice Contínua	38	154.800	94	1.650	20
22513	Hélice Contínua	34	144.100	113	1.280	16
24213	Hélice Contínua	31	107.500	101	1.060	24
4314	Metálica	38	282.050	207	1.360	22
5015	Metálica	15	46.780	47	1.000	36
7213	Metálica	32	79.780	66	1.210	44
3113	Metálica	39	163.030	110	1.480	45
7914	Metálica	39	171.330	115	1.490	50
14014	Metálica	35	241.380	143	1.690	50

Geralmente, a estaca hélice contínua não necessita alcançar grande profundidade para obter carga de trabalho suficiente para a estrutura, diferente do caso das obras com estacas metálicas, as quais devem atingir um comprimento necessário para transferir as cargas em camadas que ofereçam capacidade de carga. Com isso, percebe-se que o comprimento médio das estacas metálicas (aproximadamente 42 m) equivale ao dobro do comprimento médio da hélice contínua (aproximadamente 21 m).

Os perfis geotécnicos das obras com estacas do tipo hélice contínua são predominantemente formados por areias siltosas intercaladas por lentes de argilas silto-arenosas até atingir uma camada de areia argilosa muito compacta. Porém, as estacas não estão necessariamente apoiadas nas camadas mais resistentes, pois, o atrito gerado pelo fuste da estaca permite a transmissão de carga sem a necessidade de atingir o extrato mais resistente.

O perfil geotécnico das obras com estacas metálicas é composto inicialmente por uma rasa camada de areia siltosa de baixa resistência, seguido por uma espessa camada de argila mole a muito mole intercalada por curtas camadas de areias silto-argilosas até atingir um horizonte de areia siltosa com resistência suficiente para suportar a solicitação da superestrutura. Então, para satisfazer a carga de trabalho necessária para a estrutura, as estacas foram cravadas até o extrato mais resistente devido a presença de solo mole que possui baixa contribuição de atrito ao longo do fuste.

## 5.2 Analogia da Medição de Recalque com a Prova de Carga Estática

Segundo Gusmão (2018), para mensurar a intensidade do efeito de grupo em fundações profundas, precisa-se comparar o comportamento de uma estaca isolada com o desempenho do grupo de estacas, sendo assim, a razão entre os controles de qualidade aplicados permitem aferir o acréscimo de recalque para a mesma intensidade de carga. O gráfico da Figura 2 apresenta a composição do diagrama carga-recalque da estaca isolada com a medição de recalque de uma das obras analisadas neste trabalho, onde, pode-se comparar o recalque da estaca isolada com o recalque do grupo de estacas.

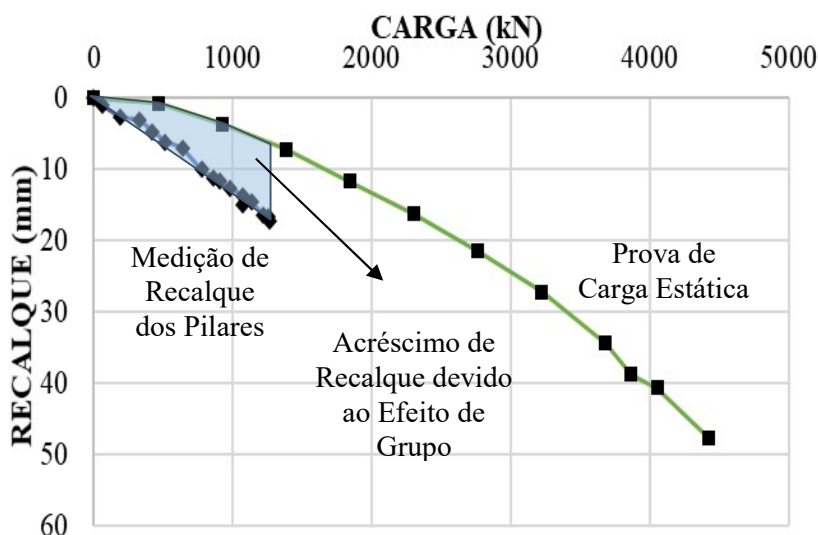


Figura 2. Curvas carga-recalque do ensaio de prova de carga estática e do monitoramento de recalque de pilares de uma das obras analisadas.

O intervalo entre as duas curvas representa o incremento de recalque devido ao efeito de grupo gerado pela superposição dos bulbos de tensões nos estratos dos perfis geotécnicos. Dessa forma, os autores denominaram a relação entre o recalque do grupo com o recalque de uma estaca isolada como o Fator de Grupo – G, que pode ser expressa como:

$$G = \frac{\delta_{grupo}}{\delta_{isolado}} \quad (5)$$

## 6 RESULTADOS

### 6.1 Medições de Recalque

Os produtos das medições proporcionaram os recalques de todos os pilares dos edifícios que, considerando o bloco de coroamento rígido, representam os recalques das estacas, e com isso, calcula-se o recalque médio de todos os pilares que compõem a estrutura. As medições também oferecem a carga média por estaca através da carga atuante dividida pela quantidade de estacas na torre. Os recalques médios absolutos em função do tempo de medição podem ser observados nos gráficos das Figuras 3 e 4 a seguir.

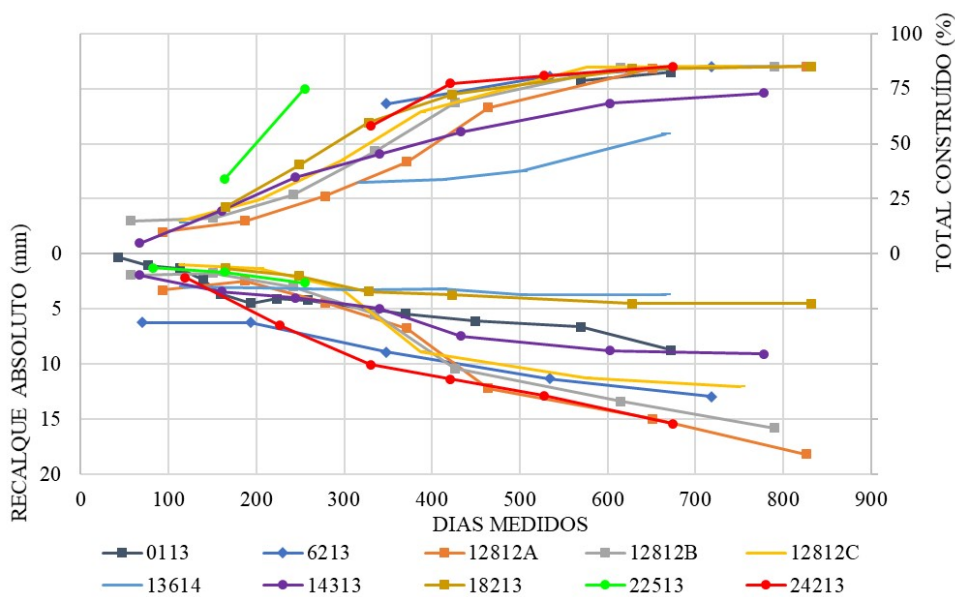


Figura 3. Gráfico de recalque absoluto médio dos pilares e a porcentagem da carga já construída em função do tempo de medição das obras com estacas do tipo hélice contínua.

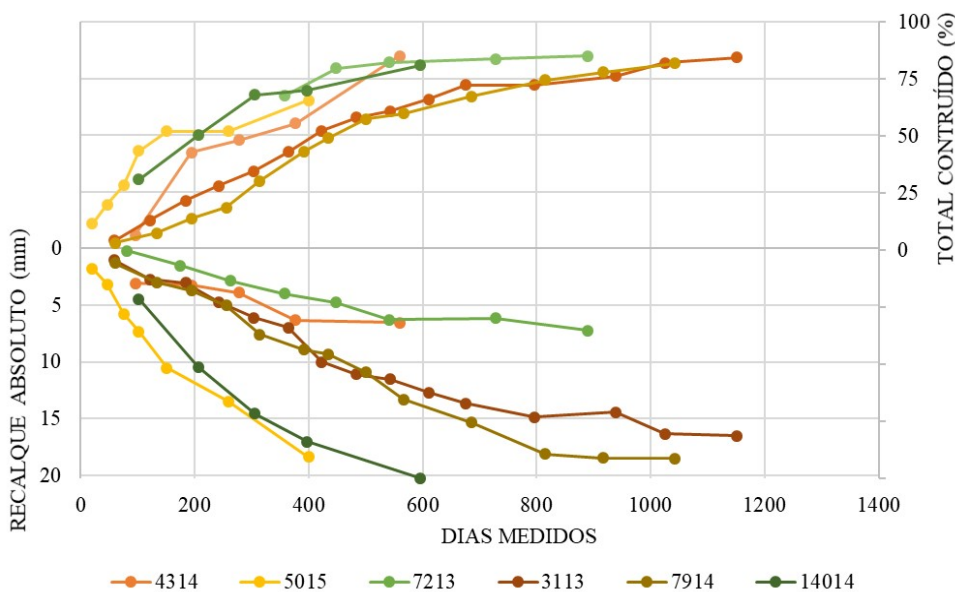


Figura 4. Gráfico de recalque absoluto médio dos pilares e a porcentagem da carga já construída em função do tempo de medição das obras com estacas do tipo metálica.

Através dos gráficos das Figuras 3 e 4, percebe-se que, tendo como relação o comportamento das estacas hélice contínua, o comportamento das estacas metálicas apresentaram valores mais dispersos em função do ritmo construtivo, e ainda, os máximos recalques aferidos.

Para mensurar o efeito de grupo comparando-o com a prova de carga estática, foram plotados os diagramas carga - recalque dos grupos de estacas conforme apresentado nas Figuras 5 e 6 a seguir.

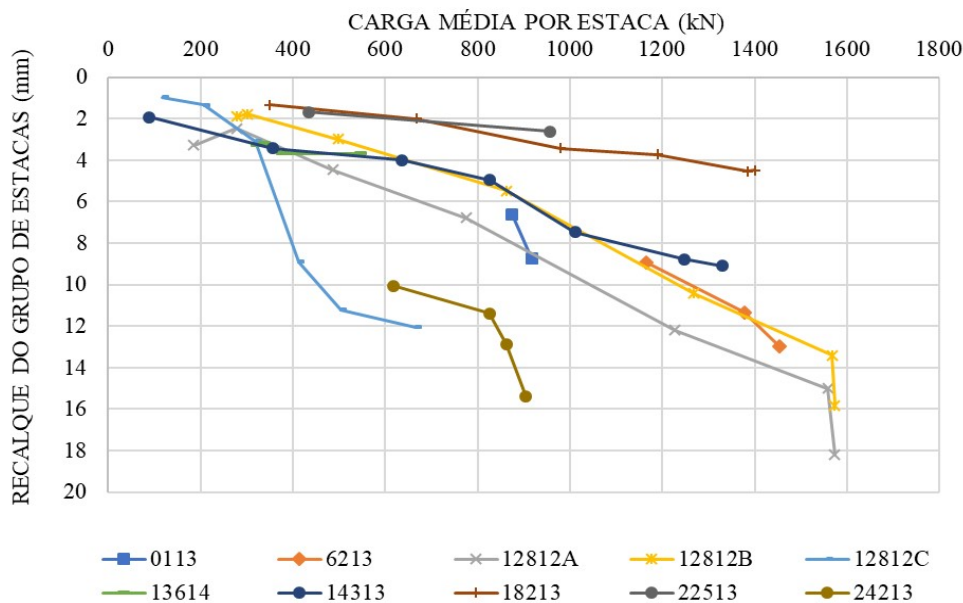


Figura 5. Gráfico de carga-recalque dos grupos de estacas do tipo hélice contínua.

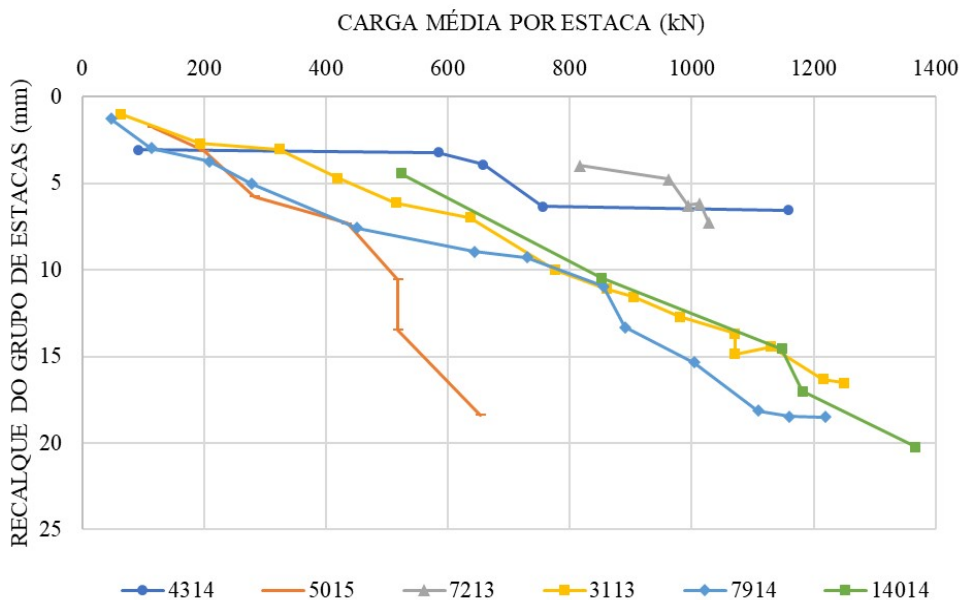


Figura 6. Gráfico de carga-recalque dos grupos de estacas do tipo metálica.

Os resultados dos diagramas mostram o desempenho dos recalques quanto à magnitude de carga, e evidenciam que, em virtude da identidade geotécnica para as quais as fundações foram projetadas, as estacas do tipo hélice contínua apresentaram rigidez superior a das estacas metálicas. Certamente, as deformações geradas nas estacas metálicas foram mais excessivas devido à baixa resistência de atrito em consequência dos depósitos de solos moles ao longo do fuste das estacas, e então, sofrendo maiores recalques por possuírem resistência por ponta.

## 6.2 Prova de Carga Estática

Os resultados forneceram os dados para compor as curvas carga-recalque hipotéticas das estacas isoladas, a seguir nas Figuras 7 e 8 estão apresentados os pontos do trecho de compressão curva carga-recalque geradas do ensaio de prova de carga estática e os respectivos ajustes exponenciais pelo método de Van Der Veen (1953).

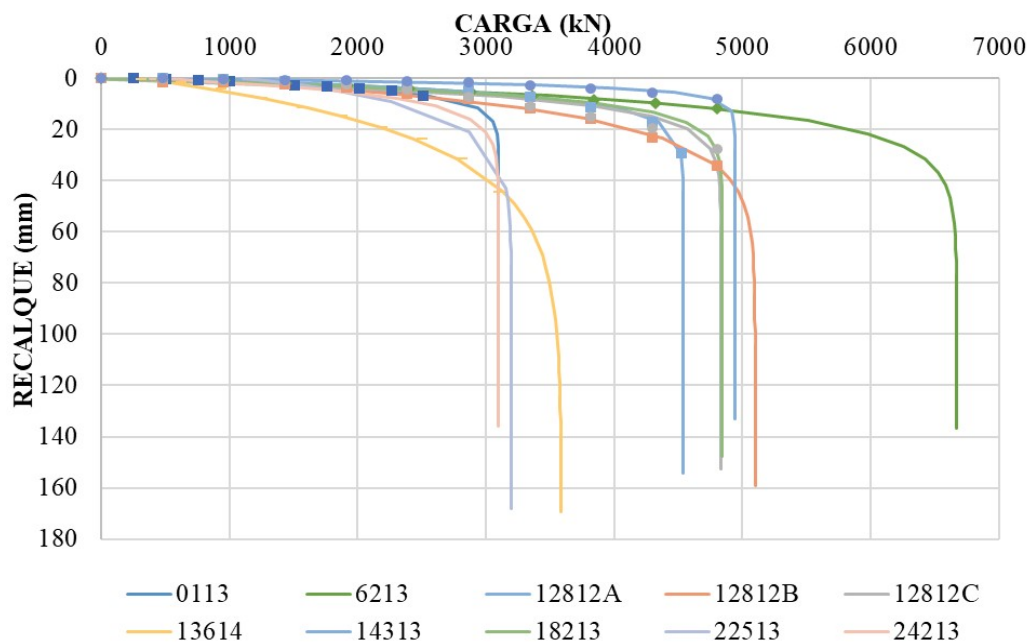


Figura 7. Gráfico de carga-recalque de uma estaca isolada do tipo hélice contínua.

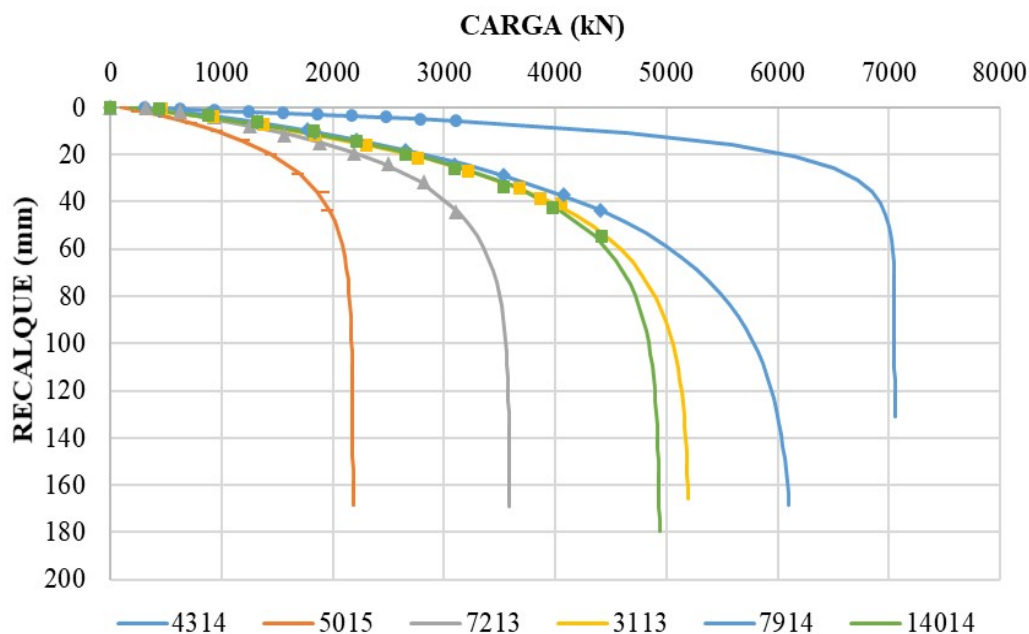


Figura 8. Gráfico de carga-recalque de uma estaca isolada do tipo metálica.

Os resultados contiveram desempenho satisfatório quanto à magnitude do recalque para a carga de serviço a ser solicitada pela estrutura, no entanto, os recalques não representam, na prática, o desempenho dos recalques do edifício.



### 6.3 Analogia da Prova de Carga Estática com as Medições de Recalque

A equação do índice de grupo relaciona o recalque do grupo de estacas com o recalque de uma estaca isolada, classificados em razão do tipo de elemento de fundação, estão apresentados graficamente nas Figuras 9 e 10 a seguir.

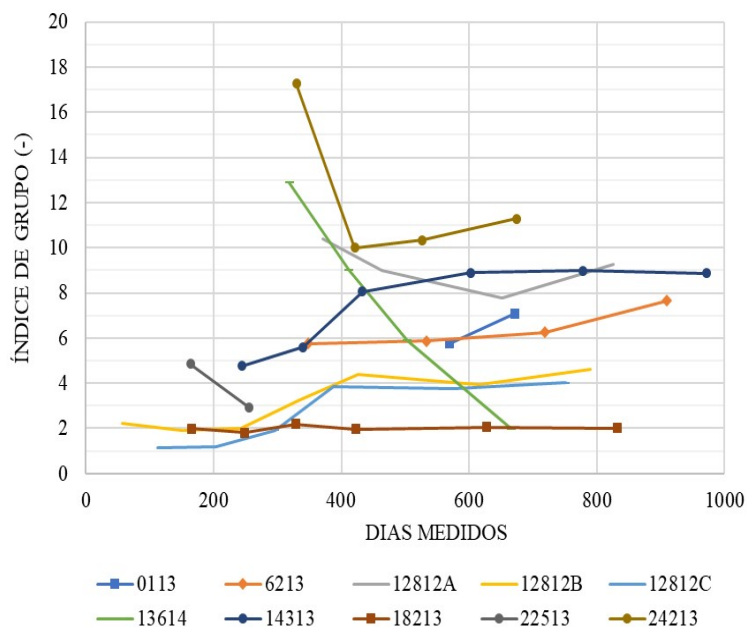


Figura 9. Fator do efeito de grupo das estacas do tipo hélice contínua.

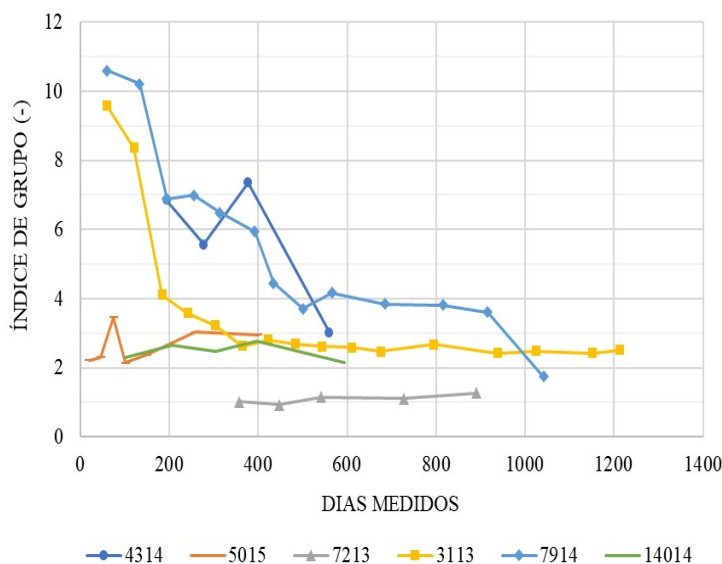


Figura 10. Fator do efeito de grupo das estacas do tipo metálica.

## 7 CONCLUSÕES

Os estudos executados neste trabalho demonstraram que em poucas obras as curvas carga-recalque de uma estaca isolada e um grupo de estacas apresentaram comportamentos similares, todavia, nas demais obras, o recalque obtido pelo grupo de estacas na última medição equivale de 2 a 10 vezes o recalque da

estaca isolada. Então, fato do acréscimo de recalque evidencia a ocorrência da sobreposição dos bulbos de tensões entre os elementos de fundação.

Para os casos onde os comportamentos da curva carga-recalque apresentaram convergência, deduz-se que as deformações ocorridas são provenientes das características do elemento de fundação, ou seja, apenas o encurtamento elástico das estacas. Quando a relação entre duas curvas carga-recalque obtiveram maior dispersão, compreende-se que as deformações são ocorridas pelo encurtamento elástico do elemento de fundação e o recalque do solo em volta das estacas.

As influências da trabalhabilidade das estacas governam, então, o desempenho da fundação devido às formas em que transmitem a carga para o solo. As estacas cravadas em um estrato de alta resistência tendem a apresentar um efeito de grupo reduzido, pois, as interferências dos bulbos de tensões serão no horizonte resistente e com isso o comportamento da estaca isolada é aproximada ao do grupo. Todavia, as estacas moldadas in loco são executadas até uma profundidade necessária para transmitir as cargas provenientes da superestrutura, e conseqüentemente concentram as sobreposições dos bulbos de tensões em estratos de resistência média, sendo susceptível a sobreposição dos bulbos de tensões e conseqüentemente a ocorrência de efeito de grupo.

Os resultados comprovaram que as estacas do tipo metálicas apresentam maiores semelhanças entre as estacas isoladas e o grupo, com uma média do fator de grupo de 2,07 e coeficiente de variação de 31%. Diferente do desempenho das estacas do tipo hélice contínua, as quais apresentaram uma média do fator de grupo de 5,97 e coeficiente de variação de 55%. Estes resultados evidenciam que o espaçamento entre eixos das estacas pode ser tanto maior quanto a contribuição de atrito, ou seja, para elementos assentes sobre substratos rochosos que há predominância por ponta, a distância mínima entre eixos pode ser diminuída.

## REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010). NBR 6122. *Projeto e execuções de fundações*. Rio de Janeiro.
- Alonso, U. R. (1989). *Previsão e Controle das Fundações*, Editora Edgard Blucher Ltda. São Paulo, p. 1 – 7; 135 – 146.
- Gusmão, A. D. (2000). *Desempenho de Fundações de Edifícios*. Simpósio de Interação Solo – Estrutura, São Carlos: Universidade de São Carlos – USP.
- Gusmão, A. D. (2006). *Desempenho de Fundações de Edifícios*. In: Palestra XIII COBRAMSEG, Curitiba, Anais, p. 215 – 240.
- Gusmão, A. D. (2018). *Efeito de Grupo em Elementos de Fundações Profundas*. IIº Seminário Pernambucano de Estruturas de Fundação, ABMS, Núcleo Nordeste, Recife.
- Kezdi, A. & Rethati, L. (1988). *Handbook of Soil Mechanics, Vol.3: Soil Mechanics of Earthworks, Foundations and Highway Engineering*. Amsterdã, Ed. Elsevier.
- Meyerhof, G. G. (1976). *Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations*, 11ª Palestra Terzaghi, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, p. 195 – 228.
- Tomlinson, M. J. (1994). *Pile Design and Construction Practice*, E & FN Spon, London, 4ª Ed., p. 166 – 199.
- Van Der Veen, C. (1953). *The Bearing Capacity of Deep Foundations in Sand*. Highway Research Record, Academia Nacional de Ciências, Conselho Nacional de Pesquisa.
- Velloso, D. A. & Lopes, F. R. (2010). *Fundações: Critério de Projeto, Investigação do Subsolo, Fundações Superficiais, Fundações Profundas, Etc.*, 2ª Ed. Oficina de Textos, São Paulo, p. 381 – 391.