DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.5/6

Análise Comparativa entre Prova de Carga Estática em Estaca Hélice Contínua e Recalques Medidos em Obra: Estudo de Caso em Campinas/SP

Roberta Signorini Dias
Mestranda em Engenharia Civil, UNICAMP, Campinas, Brasil, signorini@gmail.com

Paulo José Rocha de Albuquerque
Professor Titular, UNICAMP, Campinas, Brasil, pjra@unicamp.br

RESUMO: Este trabalho apresenta a análise comparativa entre os resultados de uma prova de carga estática em estaca hélice contínua monitorada e os recalques medidos nos pilares durante a execução de um empreendimento imobiliário na região de Campinas/SP. A estaca ensaiada tem 90 cm de diâmetro e 23,8 m de comprimento. O ensaio foi realizado pelo método de carregamento lento, atingindo carga máxima de 7.640 kN. Durante a execução do empreendimento, efetuou-se o monitoramento dos recalques dos pilares, possibilitando a avaliação do comportamento real da fundação. Os deslocamentos obtidos na prova de carga foram comparados aos recalques medidos em blocos formados por grupos de seis estacas do mesmo diâmetro. Essa análise visa compreender a correlação entre o desempenho da estaca isolada ensaiada e o comportamento dos blocos monitorados sob diferentes níveis de carregamento.

PALAVRAS-CHAVE: Prova de carga estática, Estaca hélice contínua, Recalques de fundações, Monitoramento de recalques, Efeito de grupo

ABSTRACT: This paper presents a comparative analysis of the results of a static load test performed on a monitored Continuous Flight Auger (CFA) pile and the settlements measured in columns during the construction of a real estate development located in the Campinas region, São Paulo, Brazil. The tested pile has a diameter of 90 cm and a length of 23,8 m. The static load test was carried out using the Slow Maintained Load (SML) method, reaching a maximum load of 7,640 kN. During the construction phase, column settlements were monitored, allowing the assessment of the actual behavior of the foundation system. The settlements obtained from the static load test were compared with those measured in pile caps composed of groups of six piles with the same diameter. This analysis aims to understand the correlation between the performance of the tested isolated pile and the behavior of the monitored pile groups under different loading levels.

KEYWORDS: Static Load Test; Continuous Flight Auger pile; pile settlement; settlement monitoring; group effect.

1 INTRODUÇÃO

Na prática tradicional da engenharia civil, os projetos estruturais e geotécnicos são frequentemente desenvolvidos de forma independente. O engenheiro estrutural dimensiona a superestrutura assumindo a hipótese de apoios rígidos e indeslocáveis, enquanto o engenheiro geotécnico projeta as fundações para as cargas fornecidas, respeitando limites de recalques pré-estabelecidos. Publicações clássicas de ISE, como as de Meyerhof (1953) e Chamecki (1954), já demonstram que a rigidez relativa solo-estrutura e a variabilidade da compressibilidade do maciço influenciam de forma significativa os recalques diferenciais e a redistribuição de esforços, indicando limitações no modelo que trata a infraestrutura e a superestrutura em análises independentes. Em alguns casos, desconsiderar esta interação pode resultar em estimativas irreais, comprometendo o desempenho das fundações e em casos extremos, a segurança da obra, conforme ressaltam Danziger e Lopes (2021).

Gusmão (1990) e Aoki (1997) discutem as implicações desta abordagem simplificada, apontando que a desconsideração da interação solo-estrutura (ISE) ignora o comportamento do sistema integrado, onde as deformações do solo promovem a redistribuição de esforços nos elementos estruturais.

Nesse cenário, os requisitos da NBR 6122 (ABNT, 2022) quanto à execução de provas de carga estática e ao monitoramento de recalques em obras de determinado porte constituem ferramentas fundamentais para a verificação de desempenho. O monitoramento de recalques funciona como uma prova de carga em escala real, avaliando o comportamento global da fundação e a ISE (AOKI; CHAMECKI, 2015). A obtenção destes dados em campo permite a aferição das premissas de cálculo e a comparação entre os modelos teóricos e o comportamento físico da estrutura.

Um ponto crítico na análise de desempenho refere-se à representatividade de ensaios executados em elementos isolados frente ao comportamento global de fundações em grupo. Nesse contexto, a comparação entre a resposta obtida em uma Prova de Carga Estática (PCE) em estaca isolada (executada previamente) e os recalques monitorados durante a fase construtiva permite, a posteriori, discutir a influência do efeito de grupo e da interação solo-estrutura no comportamento observado, considerando a rigidez da superestrutura e a sobreposição de tensões no maciço.

O presente trabalho tem como objetivo analisar os dados de monitoramento de recalques obtidos durante a execução de um edifício residencial em Campinas/SP e os resultados da PCE realizada previamente. Propõe-se uma análise comparativa entre a curva carga–deslocamento da PCE e os recalques medidos nos pilares associados a três blocos selecionados, discutindo, no contexto específico da obra e sob as condições reais de carregamento ao longo da construção, a ordem de grandeza do efeito de grupo observado e a resposta da fundação.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No geral, estacas isoladas, dimensionadas para atender aos estados limites últimos, apresentam recalques de pequena magnitude. Entretanto, em estruturas submetidas a cargas elevadas, cujas fundações são constituídas por blocos sobre múltiplas estacas, o comportamento global passa a ser influenciado pelo efeito de grupo e pela redistribuição dos esforços pela superestrutura. Nesses casos, o recalque do conjunto tende a ser superior àquele que cada estaca apresentaria se estivesse isolada, em função da interação entre os elementos e da sobreposição de tensões no maciço de solo (DANZIGER; LOPES, 2021).

2.1. Comportamento e recalque da estaca isolada

A previsão de recalques em estacas está relacionada à deformabilidade do solo e às tensões mobilizadas no maciço sob carregamento. A avaliação desses recalques envolve incertezas associadas às características do maciço, às propriedades geométricas e mecânicas da estaca e ao método executivo, que altera o estado de tensões e a rigidez do solo no entorno.

O processo executivo exerce papel fundamental no comportamento tensão–deformação do solo adjacente. De acordo com Vesic (1977), a execução da estaca pode modificar o estado original de tensões e as propriedades mecânicas do maciço: em estacas cravadas, observa-se, em geral, aumento de rigidez no entorno devido ao adensamento provocado pela cravação; e, em estacas escavadas, pode ocorrer redução de rigidez em função da remoção de material e do alívio de tensões durante a escavação.

O recalque de uma estaca está diretamente relacionado ao mecanismo de transferência de carga para o solo, cuja distribuição ao longo do fuste e na base não é, em geral, conhecida com exatidão. Em função do nível de carregamento aplicado, a forma de transferência de carga pode variar, com diferentes parcelas sendo mobilizadas progressivamente. Por esse motivo, Danziger e Lopes (2021) destacam que os métodos de previsão de recalques devem ser considerados soluções aproximadas, uma vez que dependem de diversas variáveis envolvidas.

A transferência de carga ocorre por meio de duas componentes principais: a resistência por atrito lateral ao longo do fuste e a resistência de ponta na base da estaca. O equilíbrio da carga aplicada no topo da estaca é garantido pela soma das resultantes das tensões cisalhantes mobilizadas no fuste e das tensões normais desenvolvidas na ponta.

O recalque total no topo da estaca pode ser decomposto em três parcelas principais: o encurtamento elástico do fuste; o recalque associado à mobilização do atrito lateral, relacionado ao deslocamento necessário para o desenvolvimento das tensões cisalhantes na interface solo–estaca; e o recalque de ponta, decorrente da compressão do solo imediatamente abaixo da base da estaca.

Dessa forma, ainda que a análise do comportamento de estacas isoladas seja fundamental, sua aplicação direta em fundações profundas compostas por grupos de estacas deve ser feita com cautela, uma vez que o comportamento do conjunto pode diferir significativamente daquele observado em estacas isoladas.

2.2. Recalques em grupos de estacas e ISE

O comportamento de um grupo de estacas difere do somatório do comportamento individual dos seus elementos. A Norma Brasileira de Projeto e Execução de Fundações (NBR 6122, 2022) define efeito de grupo como o processo de interação entre os elementos constituintes da fundação, resultante da transferência simultânea de cargas ao solo.

A interação entre as estacas gera a sobreposição de tensões, afetando o recalque e a capacidade de carga do sistema. Consequentemente, o recalque de um grupo de estacas, para uma carga média por estaca, é maior do que o recalque de uma estaca isolada sob a mesma solicitação, uma vez que essas tensões se distribuem por uma área maior do que aquela mobilizada por uma estaca isolada (DANZIGER; LOPES, 2021).

Esse comportamento é influenciado pela geometria do grupo, pelo espaçamento entre estacas, pelas características de compressibilidade do solo e pela rigidez do bloco de coroamento. Em blocos considerados rígidos, a tendência à uniformização dos recalques pode resultar em uma distribuição não uniforme das cargas, com maior solicitação das estacas periféricas, em função da maior rigidez relativa do solo nessas regiões em comparação ao núcleo do grupo (VESIC, 1977).

Embora existam métodos analíticos e empíricos para a estimativa do efeito de grupo, Danziger e Lopes (2021) alertam que a aplicação direta de formulações teóricas pode conduzir a resultados imprecisos se não forem consideradas as particularidades estratigráficas locais e o método executivo, reforçando a importância do monitoramento de campo para a validação do desempenho real.

Além do efeito de grupo, o comportamento dos recalques em fundações profundas está diretamente associado à ISE, uma vez que a rigidez relativa entre o maciço, o bloco de coroamento e a superestrutura influencia a redistribuição de cargas entre as estacas e o padrão de deformações do sistema como um todo, refletindo-se nos recalques observados nos pilares da edificação.

Nesse contexto, a avaliação dos recalques em grupos de estacas deve considerar não apenas formulações teóricas e empíricas, mas também o comportamento observado em campo, especialmente em obras instrumentadas, nas quais é possível avaliar a resposta real do sistema fundação-solo-estrutura e compará-la aos resultados obtidos em provas de carga estática.

3 ESTUDO DE CASO E CARACTERIZAÇÃO DO EMPREENDIMENTO

Este estudo baseia-se nos dados obtidos durante a construção de um empreendimento residencial, localizado na cidade de Campinas/SP, onde foram realizados a PCE e monitoramento de recalques ao longo da construção. A obra consiste em uma torre residencial com 45 pavimentos, que está inserida no contexto geológico típico da região de Campinas, caracterizado pela presença de solos residuais de diabásio.

As investigações geotécnicas indicaram uma camada superficial de aterro argilo siltoso muito mole com matéria orgânica com espessura de aproximadamente 4 m. Subjacente, foi caracterizada uma camada sedimentar de areia siltosa ou argilosa fofa com N_{spt} máximo de 3 golpes. Por volta de 10 m de profundidade, foi encontrada uma camada de argila dura até cerca de 20 m de profundidade, sobrejacente a uma camada de silte argiloso com areia fina com N_{spt} a partir de 30 golpes, até atingir o impenetrável a percussão.

Para a análise comparativa deste estudo, foram selecionados dados referentes aos blocos com estacas de ø90 cm, visto que a PCE foi realizada em uma estaca deste diâmetro com 23,8 m de comprimento. Os pilares monitorados fazem parte de blocos de coroamento de seis estacas.

O controle de recalques foi realizado por meio de leituras periódicas ao longo das etapas construtivas. Para cada campanha de medição, a carga atuante em cada pilar foi estimada com base no estágio de execução da edificação (percentual de carregamento aplicado até a data da leitura), conforme os registros de monitoramento.

A Figura 1 mostra a planta esquemática das fundações, com destaque para os blocos B17, B18 e B31, selecionados para a análise comparativa. Esses blocos foram escolhidos por apresentarem geometrias semelhantes, número idêntico de estacas (6 estacas) e estarem associados a pilares com níveis de carregamento

da mesma ordem de grandeza, permitindo uma avaliação consistente do efeito de grupo e da interação solo-estrutura. A seleção dos blocos foi condicionada à compatibilidade geométrica e ao diâmetro das estacas, sendo as diferenças de posição em planta inerentes à configuração estrutural do edifício.

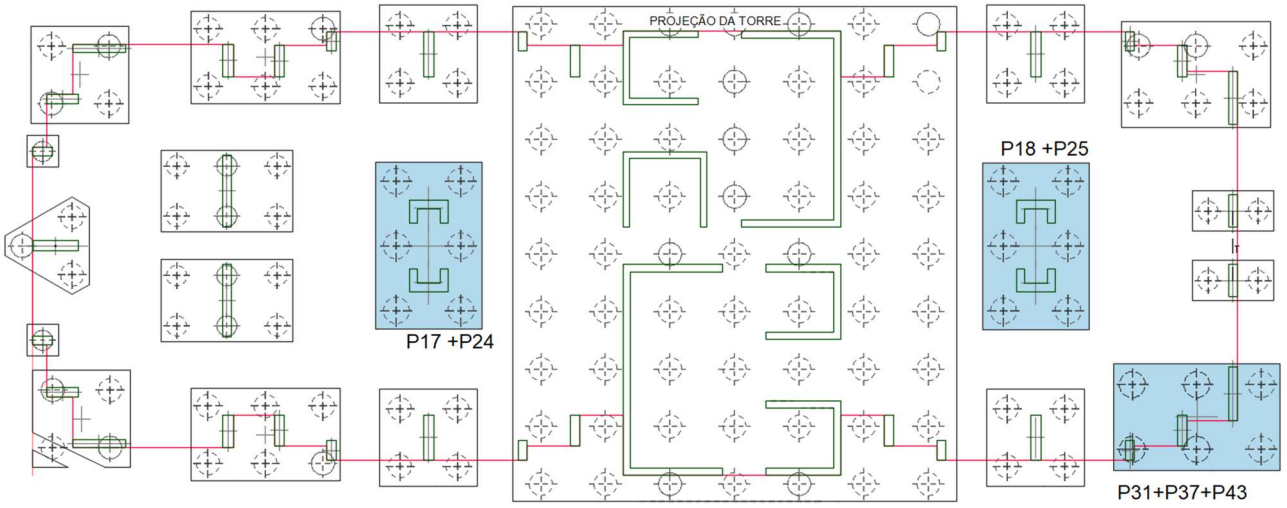


Figura 1. Planta esquemática das fundações e blocos de interesse

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são apresentados separadamente para a PCE (estaca isolada) e para os blocos monitorados, com posterior comparação em termos de carga média por estaca e recalque observado.

4.1. Curva carga × deslocamento

A prova de carga foi realizada pelo método de carregamento lento, conforme preconizado pela NBR 16.903 (ABNT, 2020). A Figura 2 apresenta a curva carga *vs* deslocamento obtida na Prova de Carga Estática (PCE) realizada na estaca de ø90 cm.

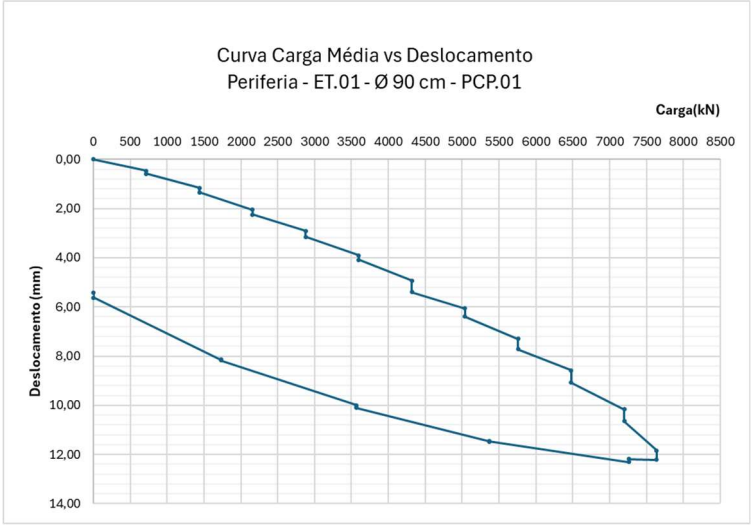


Figura 2. Curva carga *vs* deslocamento

A prova de carga foi executada em 12 estágios, com carga máxima estabilizada de 7.640 kN. Ao final do último estágio de carregamento, o deslocamento total acumulado no topo da estaca foi de 12,31 mm. Após

a conclusão dos estágios de descarregamento, registrou-se um deslocamento residual de 5,41 mm, resultando em uma recuperação elástica de 6,90 mm. Para a carga de trabalho, considerando fator de segurança igual a 2 (3.600 kN), deslocamento correspondente registrado foi de 4,08 mm. Considerando o critério normativo que permite adoção de fator de segurança igual a 1,6 quando da execução de prova de carga estática prévia, o recalque para a carga de trabalho de projeto (4.500 kN) foi de 6,39 mm.

4.2. Recalques medidos nos blocos de seis estacas

Os elementos de fundação analisados consistem em blocos de coroamento de geometria retangular, apoiados sobre seis estacas de diâmetro igual a 90 cm, com espaçamento entre eixos de 2,5 diâmetros, correspondente a 2,25 m. O programa de monitoramento englobou 16 campanhas de leitura. Entretanto, para garantir a homogeneidade da análise comparativa, o estudo do efeito de grupo foi restrito aos dados obtidos até a 15ª campanha de leitura, etapa em que se dispõem de registros simultâneos para a totalidade dos pilares que compõem os blocos B17, B18 e B31. Nessa fase, a estrutura se encontrava em estágio avançado de carregamento, permitindo uma avaliação representativa do comportamento em serviço.

A estimativa das cargas verticais atuantes foi elaborada com base no cronograma físico da obra, considerando o peso próprio da estrutura, bem como as alvenarias e revestimentos executados até a data da referida leitura. A Tabela 1 mostra a consolidação dos dados de carga vertical máxima dos pilares associados a cada bloco, enquanto a Figura 3 ilustra a evolução temporal dos recalques dos blocos analisados, correlacionada com a estimativa da carga média atuante por estaca em cada etapa de leitura.

Tabela 1. Pilares associados e cargas verticais máximas

Bloco	Pilares associados	Carga vertical máxima dos pilares associados (kN)
B17	P17 + P24	23.090
B18	P18 + P25	23.420
B31	P31 + P37 + P43	23.280

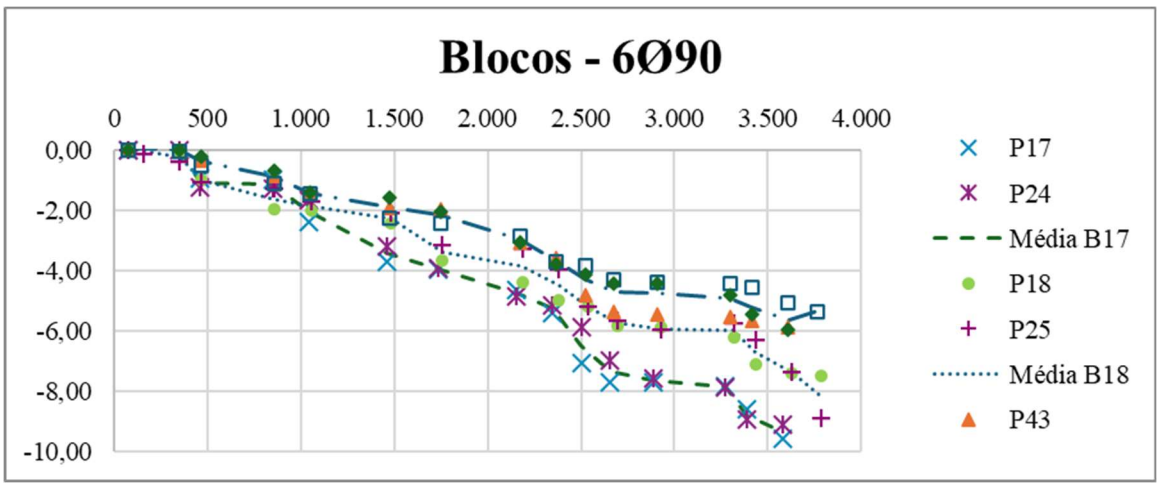


Figura 3. Deslocamentos medidos nos blocos monitorados ao longo da evolução da obra

4.3. Comparação entre prova de carga isolada e blocos

Para viabilizar a comparação direta entre o comportamento da estaca isolada (PCE) e o do grupo (blocos), os dados de monitoramento foram normalizados. A carga total atuante no pilar em cada etapa foi dividida pelo número de estacas do bloco (n=6), obtendo-se a carga média por estaca. A Figura 4 mostra a sobreposição da curva da PCE com os pontos obtidos no monitoramento dos blocos e a Figura 5 a evolução do efeito de grupo nos blocos monitorados. Na Tabela 2 são mostradas as cargas verticais dos pilares associados.

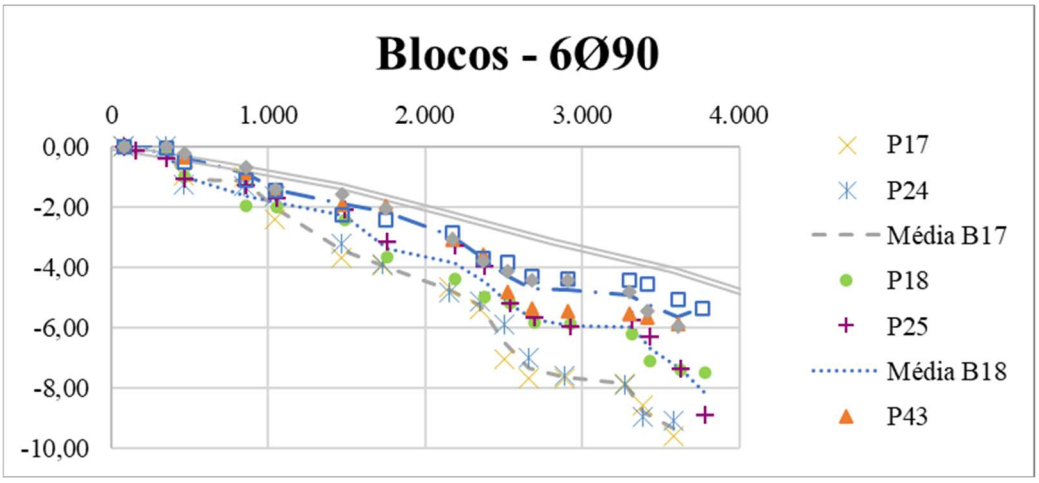


Figura 4. Gráfico Comparativo: curva PCE (linha) *vs.* deslocamentos medidos nos blocos

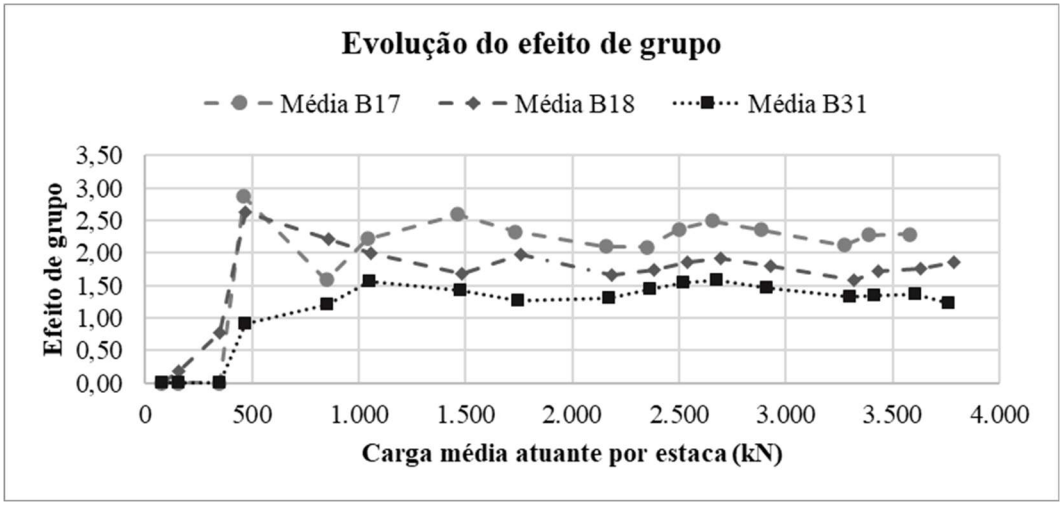


Figura 5. Evolução do efeito de grupo nos blocos monitorados.

Tabela 2. Pilares associados e cargas verticais máximas.

Bloco	Pilares associados	Carga Total Estimada do Bloco no estágio 15 (kN)	Carga média por estaca (kN)	Deslocamento médio do bloco (mm)	Deslocamento equivalente da PCE (mm)	Efeito de grupo
B17	P17 + P24	21474	3578	9,35	4,09	2,29
B18	P18 + P25	21781	3630	7,37	4,17	1,76
B31	P31 + P37 + P43	21650	3608	5,63	4,13	1,36

Os resultados demonstram que para níveis equivalentes de carga média por estaca, os blocos apresentaram deslocamentos superiores aos observados na estaca isolada ensaiada pela PCE, confirmando a influência do efeito de grupo e da ISE. Observa-se que a razão entre os deslocamentos dos blocos e da estaca isolada aumenta com o carregamento, tendendo à estabilização nos estágios mais avançados. Os blocos B17 e B18, localizados em regiões mais próximas ao núcleo da edificação, apresentaram valores médios de efeito de grupo superiores aos do bloco B31, situado em posição mais periférica, sugerindo a influência da configuração estrutural e da redistribuição de cargas no comportamento global da fundação. Pequenas oscilações observadas nos estágios iniciais de leitura são atribuídas à imprecisão inerente ao método de medição e não comprometem a análise comparativa, fundamentada na evolução dos recalques e nas tendências relativas entre os sistemas analisados.

5 CONCLUSÕES

A análise comparativa entre a prova de carga estática em estaca isolada e os recalques monitorados em blocos de seis estacas permitiu avaliar, em escala real de obra, a influência combinada do efeito de grupo e da ISE no desempenho de fundações profundas de edifício de grande porte.

Para níveis equivalentes de carga média por estaca (≈ 3.600 kN), os blocos apresentaram deslocamentos entre 1,36 e 2,29 vezes superiores aos registrados na estaca isolada ensaiada, evidenciando de forma quantitativa a ampliação da zona deformada do solo e a sobreposição de tensões decorrente do funcionamento em grupo.

Observou-se que os blocos situados em regiões próximas ao núcleo estrutural apresentaram maiores razões de efeito de grupo quando comparados ao bloco periférico, sugerindo influência da rigidez global da superestrutura na redistribuição de esforços e no padrão de recalques. Tal comportamento reforça a importância da análise integrada solo-fundação-estrutura.

Os resultados indicam que a extrapolação direta da curva carga *vs* deslocamento de estacas isoladas para fundações em grupo pode conduzir à subestimação dos deslocamentos em serviço, especialmente em edifícios altos, nos quais a interação estrutural exerce papel relevante.

Ressalta-se que a comparação foi realizada com base em cargas estimadas a partir do estágio construtivo e na hipótese de distribuição média por estaca, constituindo uma aproximação representativa, porém sujeita às incertezas inerentes à ausência de instrumentação individual das estacas nos blocos.

De modo geral, o estudo demonstra a relevância do monitoramento de recalques como ferramenta de validação de projeto e como instrumento para compreensão do comportamento real de fundações profundas, contribuindo para práticas de projeto mais realistas e alinhadas à ISE.

6 BIBLIOGRAFIA

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). *ABNT NBR 6122: Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). *ABNT NBR 16903: Solo - Prova de carga estática em fundação profunda*. Rio de Janeiro.

AOKI, N. (1997) Aspectos geotécnicos da interação estrutura - maciço solos - XXVII Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural. *Anais.* São Carlos.

AOKI, N.; CHAMECKI, P. R. Verificação de desempenho. In: FALCONI, F.; CORRÊA, C.; SCHMIDT, C.; ANTUNES, W.; ALBUQUERQUE, P.; HACHICH, W.; ORLANDO, C. *Fundações: teoria e prática.* 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. cap. 20.

CHAMECKI, S. (1954). Consideração da rigidez da estrutura no cálculo dos recalques da fundação. I CBMS. *Anais.* ABMS. 1954. p. 35-80.

DANZIGER, B. R.; LOPES, F. R. F (2021) *Fundações em estacas.* 1.ed. Rio de Janeiro: LTC.

GUSMÃO, A. D. (1990) *Estudo da interação solo-estrutura e sua influência em recalques de edificações*. 1990. Dissertação (Mestrado) — COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MEYERHOF, G. G. (1953) *Some recent foundation research and its application to design.* The Structural Engineer, Vol.31. p. 151-167

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. (2010) *Fundações*. São Paulo: Oficina de Textos.

VESIC, A. S. (1977) *Design of pile foundations*. Washington, DC: Transportation Research Board, National Research Council.