

Estudo da Eficiência de Fundações com Solução em Radier Estaqueado para Prédios Altos

Marcos Fábio Porto de Aguiar

Professor, D.Sc., Instituto Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, marcosporto@ifce.edu.br

Luiz Kauã Grangeiro Barata

Estudante de Eng. Civil, Instituto Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, luiz.kaua.grangeiro@gmail.com

Sophia Petermuller

Graduada em Engenharia Civil, Instituto Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, sophiapetermuller@gmail.com

Marina Albuquerque Porto de Aguiar

Estudante de Eng. Civil, Instituto Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, marina.aportoa@gmail.com

RESUMO: O presente trabalho tem como objetivo verificar o desempenho da solução de fundação em radier estaqueado em prédio alto em Fortaleza-CE, por meio da análise do comportamento carga x recalque, durante o período de construção. Inicialmente, foi realizada uma revisão da literatura técnico-científica sobre radier estaqueado, seguida pela definição de um programa de monitoramento de recalque com altimetria de precisão. A partir de uma referência de nível profunda (*benchmark*), foram realizados nove nivelamentos utilizando-se nível de precisão com micrômetro, definidos como estágios de monitoramento, nas diversas etapas da obra. Foram monitorados, no referido programa, 13 pilares. Os resultados foram apresentados em gráficos de carga x deslocamento vertical, sendo as cargas estimadas pelo projetista da estrutura do prédio. A partir dos resultados, foi possível identificar o desempenho adequado da solução de fundação em radier estaqueado em escala real, assim como verificar a distribuição dos recalques na área do radier a cada estágio da construção.

PALAVRAS-CHAVE: Radier estaqueado. Prédio alto. Monitoramento de recalque. Desempenho de fundações.

ABSTRACT: The present work aims to verify the performance of the piled raft foundation solution in a tall building in Fortaleza-CE through the analysis of load-settlement behavior during the construction period. Initially, a review of the technical-scientific literature on piled raft foundations was conducted, followed by the definition of a settlement monitoring program with precision altimetry. Using a deep level reference (*benchmark*), nine levelings were performed using a precision level with a micrometer, defined as monitoring stages at various phases of the construction. In the referred program, 13 columns were monitored. The results were presented in load-vertical displacement graphs, with the loads estimated by the building's structural designer. Based on the results, it was possible to identify the adequate performance of the piled raft foundation solution at full scale, as well as to verify the distribution of settlements in the raft area at each stage of the construction.

KEYWORDS: Piled raft foundation. High-rise building. Settlement monitoring. Foundation performance.

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, diante do rápido crescimento populacional nas metrópoles, tem-se observado uma tendência à verticalização das construções, especialmente em regiões litorâneas. A construção de edifícios altos com um elevado número de pavimentos implica em uma maior necessidade de capacidade de suporte dos elementos de fundação, responsáveis por transmitir as cargas da superestrutura para o solo. Para os engenheiros responsáveis pelo projeto de fundações, a habilidade de oferecer diferentes soluções para os diversos desafios que possam surgir durante as etapas de projeto e execução é essencial.

Nessa perspectiva, diferentes técnicas vêm sendo desenvolvidas a fim de possibilitar uma interação solo-estrutura mais eficiente, evitando assim a ocorrência de manifestações patológicas decorrentes de recalques excessivos. Uma dessas soluções é o radier estaqueado, um tipo de fundação mista que se destaca como uma opção técnica e economicamente viável para a construção de edifícios altos. Essa abordagem combina características de fundações profundas e superficiais, o que proporciona uma distribuição eficaz das cargas da superestrutura para o solo.

As estacas demonstram eficácia na redução de recalques. Ao combinar sua contribuição com a capacidade de carga do bloco ou radier, a fundação em radier estaqueado se mostra como um sistema que não apenas aprimora o desempenho, mas também pode gerar economia. A economia observada em projetos com fundações em radier estaqueado é possibilitada pela maior capacidade de carga do sistema em comparação com o sistema tradicional de grupo de estacas. Isso implica na possibilidade de reduzir o número de estacas necessárias ou o comprimento do estaqueamento (Basile, 2015).

2 CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA

Até o início da década de 60, a maior parte das pesquisas de campo e laboratório sobre estacas se concentrava exclusivamente no desempenho de estacas isoladas e grupos de estacas sem considerar o contato do bloco com o solo. As análises teóricas de grupos de estacas também costumavam evitar a investigação da interação entre o bloco e as estacas, buscando simplificar o número de interações envolvidas no problema (Butterfield e Banerjee, 1971).

Zeevaert (1957) é reconhecido como um dos pioneiros na utilização da técnica de radier estaqueado, visando mitigar os recalques em fundações por sapata através da inserção de um número específico de estacas para oferecer um suporte parcial. Por sua vez, Kishida e Meyerhof (1965) realizaram um dos primeiros estudos teóricos que contemplam a influência de um bloco apoiado no solo em um sistema de radier estaqueado.

Dentre os primeiros estudos teóricos sobre o comportamento carga *versus* recalque de uma fundação com a presença de um elemento superficial associado a uma estaca, destaca-se o trabalho de Poulos (1968). O autor analisou a interação estaca/bloco em um sistema onde uma estaca isolada está inserida em um radier em contato com o solo (Figura 1). Considerando o solo como um semiespaço elástico e o radier como elemento rígido em contato com o solo, Poulos analisou diferentes parâmetros (Figura 2), incluindo o comprimento (L) e o diâmetro (d) da estaca, e o diâmetro circular do radier em contato com o solo (d_c). Concluiu-se que a influência do contato na redução dos recalques é maior quando a relação entre o comprimento da estaca e seu diâmetro (L/d) é menor, destacando a importância de não negligenciar o contato para estacas curtas ($L/d < 10$). Essa situação se explica pela menor contribuição nas forças de resistência associadas ao fuste da estaca.

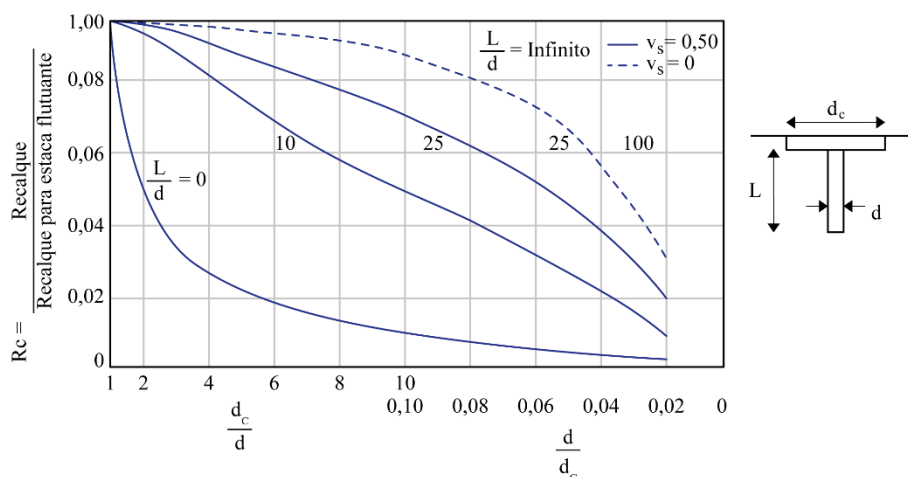


Figura 1. Efeito do contato em estaca isolada (adaptado de Poulos, 1968).

Para a avaliação simplificada do comportamento do sistema de radier estaqueado, Mandolini (2003) propôs a utilização do coeficiente α_{PR} . Esse coeficiente varia de 0 a 1, onde $\alpha_{PR} = 0$ indica que toda a carga é absorvida pelo radier isoladamente, enquanto $\alpha_{PR} = 1$ significa que toda a carga é suportada pelas estacas.

Portanto, o coeficiente α_{PR} do radier estaqueado reflete a proporção de distribuição de carga entre o radier e as estacas (Figura 2).

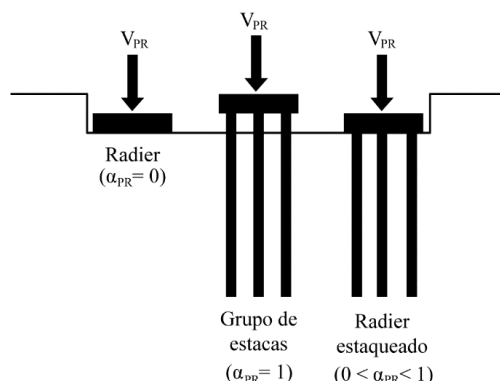


Figura 2. Diferentes sistemas de fundações (adaptado de Mandolini *et al.*, 2003).

Mandolini, Di Laora e Mascarucci (2013) demonstraram que a porcentagem de carga recebida pelo radier da superestrutura varia conforme diversos fatores, como a distância entre estacas (s), o diâmetro das estacas (d), a área ocupada pelo grupo de estacas (a_g) e a área do radier (a_r). A análise dos resultados apresentados pelos autores (Figura 3) revela que a porcentagem de esforços suportados pelo radier não é inferior a aproximadamente 15%, podendo a sua contribuição superar a das estacas, resistindo a até 70% da carga total.

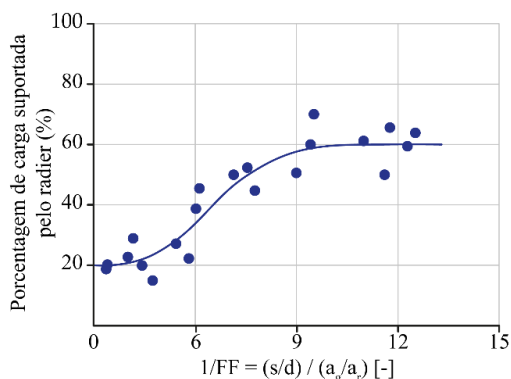


Figura 3. Porcentagem de carga resistida pelo radier (adaptado de Mandolini *et al.*, 2013).

Burland *et al.* (1977), ressaltaram em seu estudo que, na maioria dos projetos de fundações em estacas, apenas o critério de capacidade de carga era considerado, apesar do baixo nível de recalques geralmente alcançados. Os autores sugeriram que seria mais econômico buscar, em um projeto, uma quantidade mínima de estacas que proporcionasse um recalque aceitável para a fundação em questão. Introduziram, assim, o termo "elementos redutores de recalque" para as estacas, em projetos de grupos de estacas, onde o critério de recalque aceitável se tornaria preponderante.

Para obras de grande porte, a norma NBR 6122 (ABNT, 2022) ressalta a importância da verificação do desempenho das fundações através do monitoramento de recalques. Além disso, a norma enfatiza os casos em que o monitoramento é obrigatório, incluindo estruturas onde a carga variável é significativa em relação à carga total, como silos e reservatórios; estruturas com altura superior a 55,00 m do piso do térreo até a laje de cobertura do último piso habitável; relação altura/largura (menor dimensão) superior a quatro; e fundações ou estruturas não convencionais. O projeto de fundações deve detalhar o programa de monitoramento, incluindo elementos como a referência de nível (indeslocável), a precisão das medidas, a frequência e o período em que as leituras serão realizadas.

Alonso (2019) ressalta a importância de não apenas controlar os recalques diferenciais para garantir que permaneçam dentro de limites que não comprometam a integridade da estrutura, mas também de regular a

velocidade desses recalques. Abaixo são apresentados os parâmetros propostos pelo autor relativos à velocidade de recalque:

- Para edifícios construídos há mais de cinco anos, considerados estáveis: velocidades entre 20,00 e 40,00 $\mu\text{m}/\text{dia}$ são consideradas moderadas a altas, enquanto velocidades acima de 40,00 $\mu\text{m}/\text{dia}$ são classificadas como muito altas;
- Para edifícios construídos há mais de um ano e menos de cinco anos: são aceitáveis valores de até 30,00 $\mu\text{m}/\text{dia}$;
- Para edifícios em processo de construção e apoiados em fundação rasa, velocidades de até 200,00 $\mu\text{m}/\text{dia}$ podem ser consideradas normais. No entanto, se apoiados em fundações profundas, essa velocidade admissível reduz-se para 100,00 $\mu\text{m}/\text{dia}$.

A norma NBR 13133 (ABNT, 2021) menciona que uma das técnicas empregadas para o monitoramento de recalques é denominada nivelamento geométrico. Esse método envolve a medição das discrepâncias de altura entre pontos selecionados, utilizando leituras vinculadas a visadas horizontais. Para isso, emprega-se um nível em miras verticalmente posicionadas nos pontos de interesse.

Segundo Alonso (2019), para mensurar os deslocamentos, procede-se com o nivelamento dos pontos de referência, que consistem em pinos fixados nos pilares e estão vinculados a uma referência de nível (RN) estática. Os pinos de monitoramento possuem uma parte fêmea, fixada na estrutura, e uma parte macho com uma extremidade esférica. A mira utilizada para medir o nível é posicionada acima da parte esférica, atuando como referência móvel durante a verificação (Figura 4).

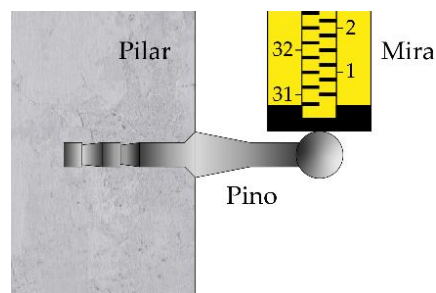


Figura 4. Desenho esquemático de um pino de referência engastado em um pilar.

Para analisar a interação solo-estrutura e monitorar os deslocamentos verticais, faz-se necessária a adoção de um ponto teoricamente fixo como referência de nível para todos os nivelamentos que serão realizadas. Em projetos de grande porte, recomenda-se estabelecer uma referência de nível profunda, também conhecida como *benchmark* (Figura 5), que consiste em um ponto fixo e imutável utilizado para monitorar recalques (Petrobras, 2005).

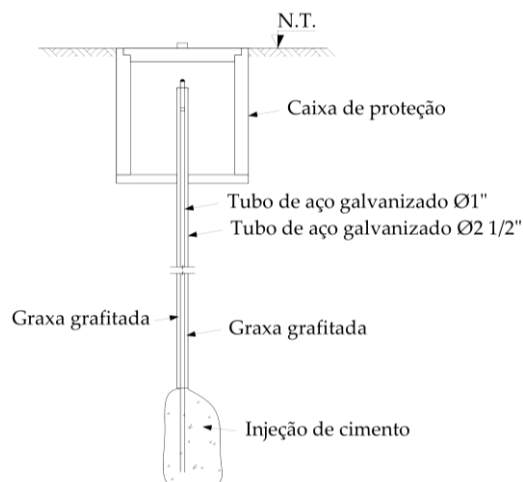


Figura 5. Desenho esquemático da referência de nível profunda.

A instalação da referência de nível profunda requer cuidado na escolha do local, garantindo sua proteção contra influências da obra ou outros fatores que possam comprometer sua estabilidade, como observado por Alonso (2019). Isso assegura a confiabilidade desse ponto de referência fundamental para a análise dos deslocamentos verticais na estrutura ao longo do tempo.

3 ESTUDO DE CASO

O presente estudo fundamenta-se no monitoramento de recalques realizado em uma obra localizada no bairro Meireles, na cidade de Fortaleza, Ceará. Utilizando altimetria de alta precisão, o monitoramento foi conduzido em uma construção na região litorânea da cidade. O edifício em questão possui 49 pavimentos, com estrutura em concreto armado e protendido (lajes), além de fundações compostas por estacas de 800,00mm de diâmetro na torre (radier estaqueado) e estacas de 500,00mm de diâmetro em estruturas secundárias (TECNOL, 2023).

O monitoramento dos recalques foi realizado em 13 dos pilares da torre (P-01 ao P-13) ao longo de um período de 18 meses, abrangendo os diversos estágios da construção. A Figura 6, em planta, ilustra a localização dos pilares no subsolo inferior, assim como a disposição dos pinos de referência instalados.

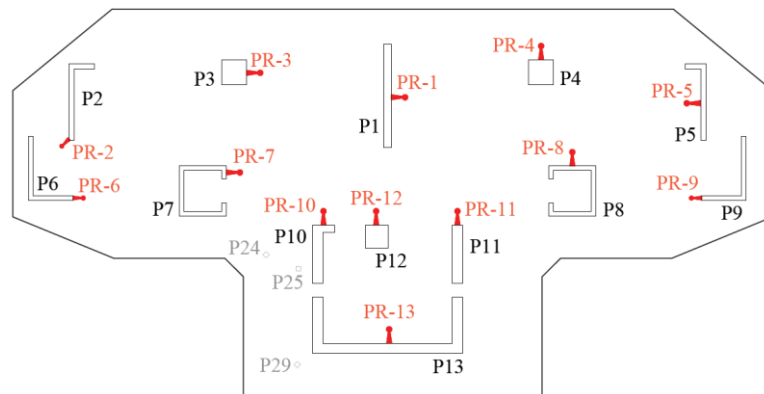


Figura 6. Planta de posicionamento dos pinos para medição de recalque (TECNOL, 2023).

Estabelecida uma cota arbitrária como referência de nível, foram calculadas as diferenças de altura dos pinos em relação a essa referência. Utilizando apenas diferentes pontos de visada, sem a necessidade de pontos auxiliares, foi possível determinar as cotas iniciais dos pinos, essenciais para medições subsequentes. A Figura 7, a seguir, ilustra uma seção do edifício em questão com a identificação dos pavimentos e números de tetos.

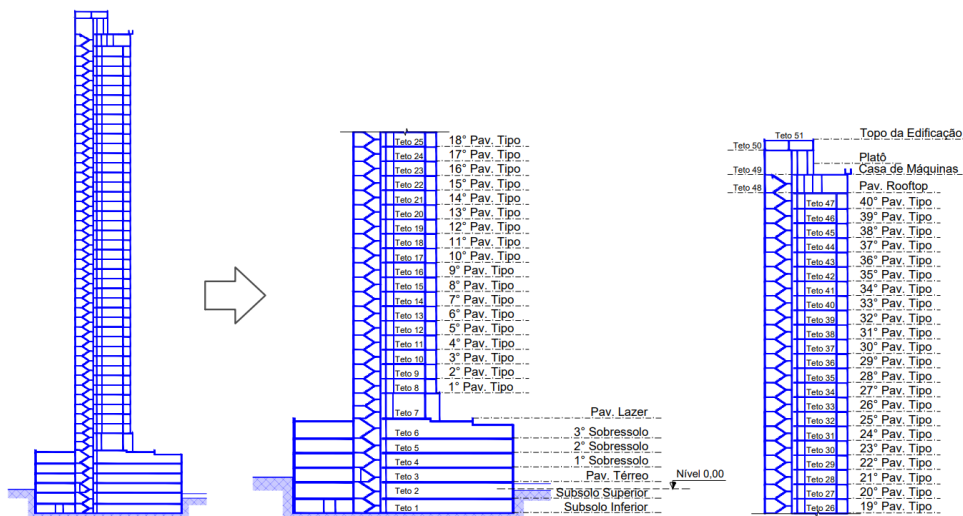


Figura 7. Esquema gráfico da obra no último nivelamento (TECNOL, 2023).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para todos os pilares instrumentados, houve uma tendência de aumento gradual nos deslocamentos verticais absolutos ao longo do período de construção devido aos incrementos de carga, conforme a Figura 8.

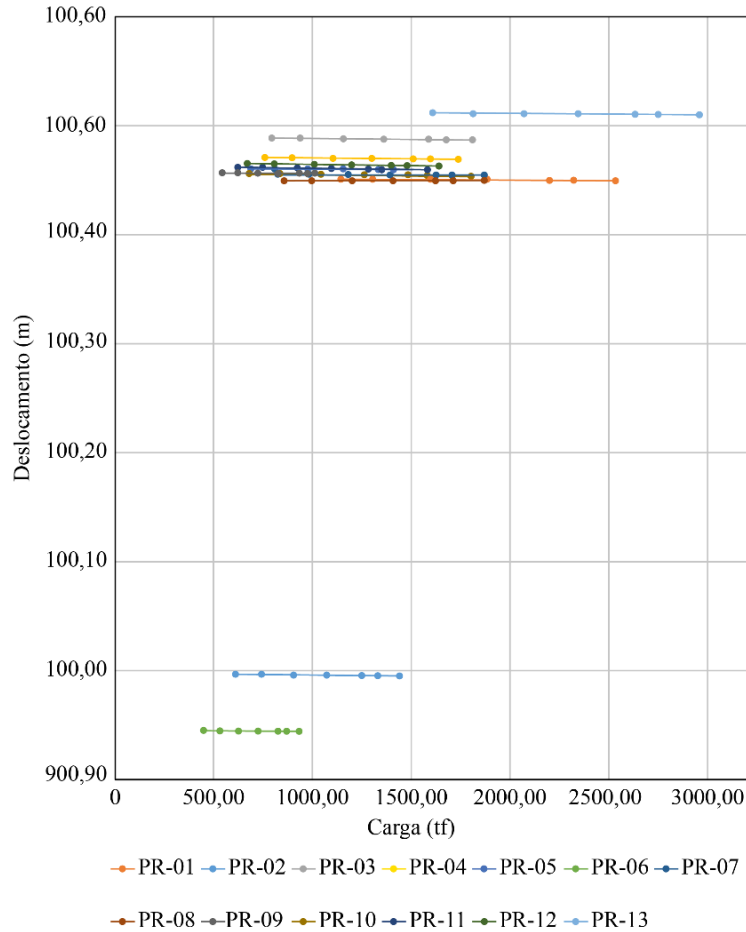


Figura 8. Gráfico carga x deslocamento (TECNOL, 2023).

Considerando os estágios da obra nos nivelamentos N-00 a N-08, a Tabela 1 apresenta os deslocamentos verticais de cada pino de referência ao longo do tempo. Foram realizados nove nivelamentos, resultando na medição de oito valores de recalque em relação ao nivelamento inicial para cada um dos pinos monitorados.

Tabela 1. Diferenças de cotas (deslocamentos verticais) em relação ao nivelamento de referência (N-00).

Pino	Deslocamento vertical no pilar (mm)									
	N-01 N-00	N-02 N-00	N-03 N-00	N-04 N-00	N-05 N-00	N-06 N-00	N-07 N-00	N-08 N-00		
PR-01	0,23	0,34	0,71	1,07	1,15	1,97	2,12	2,64		
PR-02	0,00	0,02	0,52	1,08	0,96	1,41	2,20	1,93		
PR-03	0,19	0,25	1,02	1,12	1,20	1,68	1,75	2,38		
PR-04	0,07	0,07	0,51	0,69	0,82	1,49	1,87	2,03		
PR-05	0,01	0,19	0,58	0,92	0,85	1,24	1,55	1,63		
PR-06	0,02	0,02	0,67	1,10	0,84	1,48	2,13	2,07		
PR-07	0,06	0,11	0,39	0,81	0,92	1,07	1,20	1,66		
PR-08	0,17	0,23	0,67	0,96	1,21	1,44	1,79	1,92		
PR-09	-0,05	0,02	0,37	0,66	0,81	1,01	1,03	1,28		
PR-10	0,04	0,52	0,83	0,87	1,32	1,52	1,76	1,62		
PR-11	0,09	0,16	0,58	0,88	1,04	1,61	1,68	2,38		
PR-12	0,13	0,37	0,79	1,29	1,50	1,87	2,02	2,59		
PR-13	0,16	0,28	0,91	1,23	1,23	1,52	1,64	1,99		

Para melhor ilustrar o comportamento dos deslocamentos verticais medidos, o *software* SURFER foi utilizado para gerar representações dos recalques em planta (Figura 9a) e em superfície tridimensional (Figura 9b). Essas representações foram baseadas nas coordenadas de cada pino nos pilares monitorados e nos valores de recalque obtidos no nivelamento N-08.

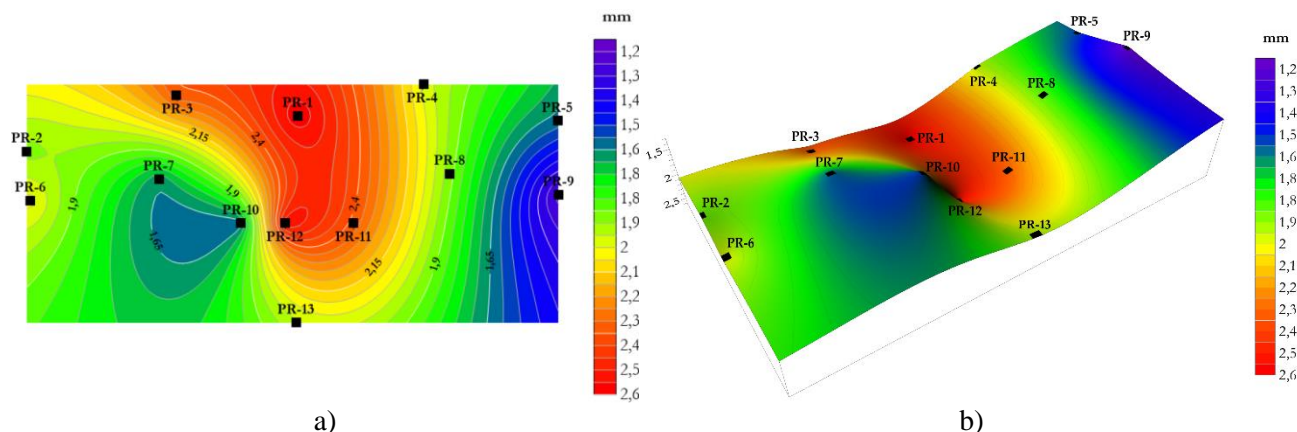


Figura 9. Nivelamento N-08: a) superfície plana e b) superfície tridimensional.

5 CONCLUSÕES

Este estudo empregou técnicas de nivelamento geométrico para investigar o desempenho de um edifício alto com solução de fundação em radier estaqueado, durante sua fase de construção na região litorânea de Fortaleza-CE, no nordeste do Brasil. Dada a relevância da avaliação da interação solo-estrutura em edifícios altos, os resultados do monitoramento dos recalques foram apresentados.

Os resultados indicam que a utilização do sistema de nivelamento geométrico para análise de recalques proporcionou uma compreensão importante do comportamento da solução de fundação adotada ao longo do tempo, especialmente com o aumento das cargas provenientes da superestrutura do edifício monitorado, identificando-se uma variação mínima nos deslocamentos verticais durante o período de monitoramento, sugerindo um bom comportamento mecânico da solução de fundação empregada na edificação.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa teve o apoio e colaboração do Grupo de Pesquisa em Geotecnia e Infraestrutura de Transportes (GPGE) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, *Campus* Fortaleza. Os autores expressam seus agradecimentos a Normatel Engenharia, na pessoa do engenheiro Fernando Meirelles Cabral, Diretor, pela permissão concedida de divulgar os dados dessa obra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, U. R. (2019) *Previsão e Controle das Fundações*. São Paulo: Edgard Blucher.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 6122. *Solo - Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2021). NBR 13133. *Execução de levantamento topográfico*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006). NBR 12131. *Estacas - Prova de carga estática: método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Basile, F. (2015) "Non-linear analysis of vertically loaded piled rafts". *Computers and Geotechnics*, vol. 63, pp. 73-82.

Burland, J. B., Broms, B. B., De Mello, V. F. B. (1977). Behaviour of foundations and structures. Proc. 9th ICSMFE, Tokyo, 2: 495-546.

Butterfield, R.; Banerjee, P. K. (1971) The Elastic Analysis of Compressible Piles and Pile Groups. *Geotechnique*, v. 21, n. 1, p. 43-60.

Kishida, H.; Meyerhof, G. G. (1965) Bearing capacity of pile groups under eccentric loads in sand. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 7., Toronto, 1965, *Anais [...]* Toronto: ICSMFE, p. 270-274.

Mandolini, A. (2003) Design of piled raft foundations: practice and development. In: International Seminar on Bored and Auger Piles, 6., Ghent, Belgium. *Anais [...]*. Ghent: Proceedings of Deep Foundations on Bored and Auger Piles–BAP IV, p. 59-82.

Mandolini, A., Di Laora, R., Mascarucci, Y. (2013) “Rational Design of Piled Raft”. 11th International Conference on Modern Building Materials, *Structures and Techniques*, MBMST.

PETROBRAS. (2005) N-1811: *Instalação de referência de nível profunda*. Brasil.

Poulos, H. G. (1968) “Analysis of the settlement of pile groups”. *Geotéchnique*, 18:449-471.

TECNOL, Tecnol Tecnologia de Concreto, Solo e Pavimentação. *Relatório Técnico de Monitoramento de Recalques em Prédio Residencial por Meio de Altimetria de Alta Precisão: RT-07*, Fortaleza-CE. 2023.

Zeevaert, A. (1957) Behaviour of the Latinamerican Tower in Mexico City. *Geotéchnique*, 8(3): 115-113.