

Análise da influência da sequência construtiva no desempenho de fundação por radiers estaqueados

Analysis of the influence of construction sequence on the performance of raft pile foundation

Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello¹; Raimundo Paulo Silva Júnior²; Jonny Dantas Patrício³

¹ Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Caruaru/PE, Brasil. isabelamcvbello@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3072-7836>

² Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Caruaru/PE, Brasil. pl.junior.eng@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7090-9525>

³ Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia Civil, Campina Grande/PB, Brasil. jonny_dantas@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6903-7851>

Resumo: Este artigo apresenta a análise da influência da sequência construtiva no desempenho de uma fundação por radiers estaqueados de uma edificação em estrutura de parede de concreto. Os recalques foram monitorados em campo e estimados pelo método de elementos finitos, com e sem a consideração da interação solo-estrutura (ISE) para a análise das redistribuições de deslocamentos e esforços na fundação. O processo construtivo se deu por 4 estágios por pavimento em sentido diagonal. Os recalques no quadrante 1 foram os maiores, consequência da execução parcial da edificação. No último estágio de concretagem e oposto ao quadrante 1, houve leituras negativas de recalques, o que indica levantamento da placa do radier. O monitoramento por estágios evidenciou a relação entre o número de pavimentos e a ISE. Com o aumento da rigidez da estrutura, os recalques diferenciais máximos diminuíram de 13 mm no térreo para 3 mm no quinto pavimento. Cerca de 62% das cargas foram transmitidas as estacas e cerca de 38% pelo radier. Os resultados obtidos mostraram a importância de uma análise combinada de interação do solo-estrutura com consideração do estágio de construção para entendimento de comportamento de fundações por radiers estaqueados de uma edificação em estrutura de parede de concreto.

Palavras-chave: Monitoramento; Recalque; Modelagem; Interação solo-estrutura.

Abstract: This article presents the analysis of the influence of constructive sequence on the performance of a foundation by raft piles of a building in concrete wall structure. The settlements were monitored in the field and estimated by the finite element method, with and without the consideration of soil-structure interaction (SSI) for the analysis of the redistributions of displacements and efforts in the foundation. The construction process was carried out in 4 stages per floor in a diagonal direction. The settlements in quadrant 1 were the largest, because of the partial execution of the building. In the last stage opposite quadrant 1, there were negative readings of settlements, which indicates lifting of the raft. Monitoring by stages showed the relation between the number of floors and SSI. With the increase in the stiffness of the structure, the maximum differential settlements reduced from 13 mm to the ground floor to 3 mm on the fifth floor. About 62% of the loads were transmitted to the piles and about 38% to the raft. The results showed the importance of a combined analysis of soil-structure interaction with consideration of the construction stage to understand the behavior of foundations by raft piles from a building in concrete wall structure.

Keywords: Monitoring; Settlement; Modelling; Soil-structure interaction.

1. Introdução

O uso de novos sistemas construtivos torna-se cada vez mais importante no mercado da construção civil, buscando o melhor desempenho e custo-benefício dos empreendimentos. No Brasil, com o crescimento do programa de financiamento Minha Casa Minha Vida, destacaram-se conjuntos habitacionais oriundos do sistema construtivo de paredes de concreto (SILVA JUNIOR, 2021). Associada a este sistema construtivo, as soluções de fundações em radier passaram a ser utilizada com maior frequência, visto sua alta produtividade e bom desempenho (PATRÍCIO, 2021). Em se tratando de terrenos situados sobre espessos depósitos de solo mole, comumente encontrados nas cidades situadas nas baixadas brasileiras, necessita-se de soluções de fundações complexas como o radier estaqueado.

Uma característica do modelo de fundação por radier estaqueado é a diminuição dos recalques diferenciais devido à rigidez do radier e dos recalques totais devido a ação das estacas. Um aspecto importante contemplado na NBR 6122 (2010) é a consideração da interação solo-estrutura (ISE) na avaliação do comportamento do elemento de fundação. Nas análises estruturais convencionais são considerados, usualmente, apoios indeslocáveis e os recalques dos elementos de fundação são estimados com base nas cargas distribuídas. Contudo, essa hipótese pode não ser satisfatória, principalmente, no tocante do sistema construtivo em questão, que possui rigidez global significativa. A maioria das análises de interação solo-estrutura atuais foram realizadas para estrutura em pórticos (pilares, vigas e lajes) e a literatura atual carece de análises de interação solo estrutura para edifícios de paredes de concreto com fundações em radier (PATRÍCIO *et al.*, 2024).

Não considerar a rigidez global e os deslocamentos do solo provoca fenômenos extremamente importantes, como a redistribuição de carga, e modifica completamente o quadro de tensões da estrutura. A NBR 16055:2012 (Norma brasileira regulamentadora - parede de concreto moldada no local para a construções de edifícios – Requisitos e procedimentos), afirma a não obrigatoriedade do uso da ISE para edifícios de até cinco pavimentos. Silva Júnior (2021) comenta que mesmo para edifícios até cinco pavimentos, a rigidez global da estrutura, pode influenciar diretamente na redistribuição de esforços, distorções angulares e recalques diferenciais.

Outro fator que norteia o estado de tensões global e local da estrutura é a sequência construtiva, enfatizando a importância de não considerar o carregamento instantâneo da estrutura de fundação na elaboração do projeto (BITTENCOURT, 2018). A velocidade de construção, metodologia construtiva (modular) e a significativa rigidez global da estrutura indicam a necessidade de avaliação de parâmetros de desempenho específicos para este tipo de projeto, como: velocidades de recalque, rotações dos elementos de fundação, distorções angulares, entre outros (PATRÍCIO *et al.*, 2024).

Com base nos dados de monitoramento de recalque do radier, é possível determinar por meio de retro análise os parâmetros de deformabilidade dos solos e assim contribuir de forma direta e objetiva em projetos destes tipos. Em uma análise estrutural usual, as ações são consideradas como aplicadas em sua totalidade de forma instantânea. As ações atuantes em uma estrutura real apresentam uma dependência direta da sequência construtiva, por meio da realização de uma análise evolutiva, tende a modificar a redistribuição dos esforços devido ao deslocamento diferencial entre os elementos da estrutura (FARIAS, 2018; LOPES, 2019). As medições de recalque em conjunto com uma estimativa confiável dos carregamentos nos estágios construtivos conseguem reproduzir comportamento tensão x deformação do solo, o que torna o procedimento de monitoramento um modelo real de prova de carga (SANTOS, 2018).

Com o aumento do uso do sistema construtivo de paredes de concreto associados a fundações em radier estaqueado na Região Metropolitana do Recife, tornou-se essencial o desenvolvimento de trabalhos com enfoque na avaliação do comportamento dos elementos de fundação, principalmente no que diz respeito aos recalques desenvolvidos. Existe uma escassez nessa área de pesquisa, interação solo-estrutura, com sistema estrutural parede de concreto associado a fundação mista por radier estaqueado. Outro fator relevante é o conhecimento dos parâmetros geotécnicos do solo na região, compreendida de um perfil de solo mole saturado de grande complexidade, sendo de muita importância seu estudo, pois a região ainda mostra um grande potencial de expansão imobiliária.

Este artigo apresenta uma análise do desempenho do sistema de fundações por radier estaqueado de uma edificação sobre solo saturado e estrutura em parede de concreto localizado na Região Metropolitana do Recife, considerando a influência da sequência construtiva. Trata-se de parte dos resultados da pesquisa de Silva Júnior (2021), inserida ao projeto intitulado “Estudo de fundação por radier-estaqueado de edifícios com sistema construtivo parede de concreto”, no qual foram realizados diversos estudos no mesmo local: (a) método dos elementos finitos e análise de prova de carga na previsão de comportamento de fundação em radier estaqueado (SILVA, 2021); (b) análise de diferentes cenários de apoio de fundação (ALVES *et al.*, 2022); (c) avaliação dos recalques por distorção angular em fundação por radier estaqueado (JORDÃO JÚNIOR *et al.*, 2022), (d) confiabilidade e segurança de fundação por radier estaqueado (SILVA *et al.* (2022).

2. Metodologia

2.1. Área de estudo

O empreendimento estudado está localizado na Região Metropolitana do Recife (RMR), litoral do estado de Pernambuco, Brasil (Figura 1a). Trata-se da construção de um conjunto residencial, composto por 14 blocos residenciais, cada um com cinco pavimentos (terreiro + quatro pavimentos tipo). O bloco residencial em estudo é o de número 03 (Figura 1b). As cargas da superestrutura são distribuídas à fundação através de paredes em concreto armado, moldadas *in loco*.

O perfil típico do solo foi dividido em três camadas. A primeira é constituída de areia siltosa fina e média com matéria orgânica até o fim da profundidade de 13,0 m (N_{SPT} médio = 6), seguida de uma camada de areia fina, com pouca areia média e grossa, e presença de argila mole em alguns furos, até a profundidade de 24,0 m (N_{SPT} médio = 16). A terceira camada é composta de areia siltosa compacta a muito compacta até aproximadamente 32,0 m (N_{SPT} médio = 38).

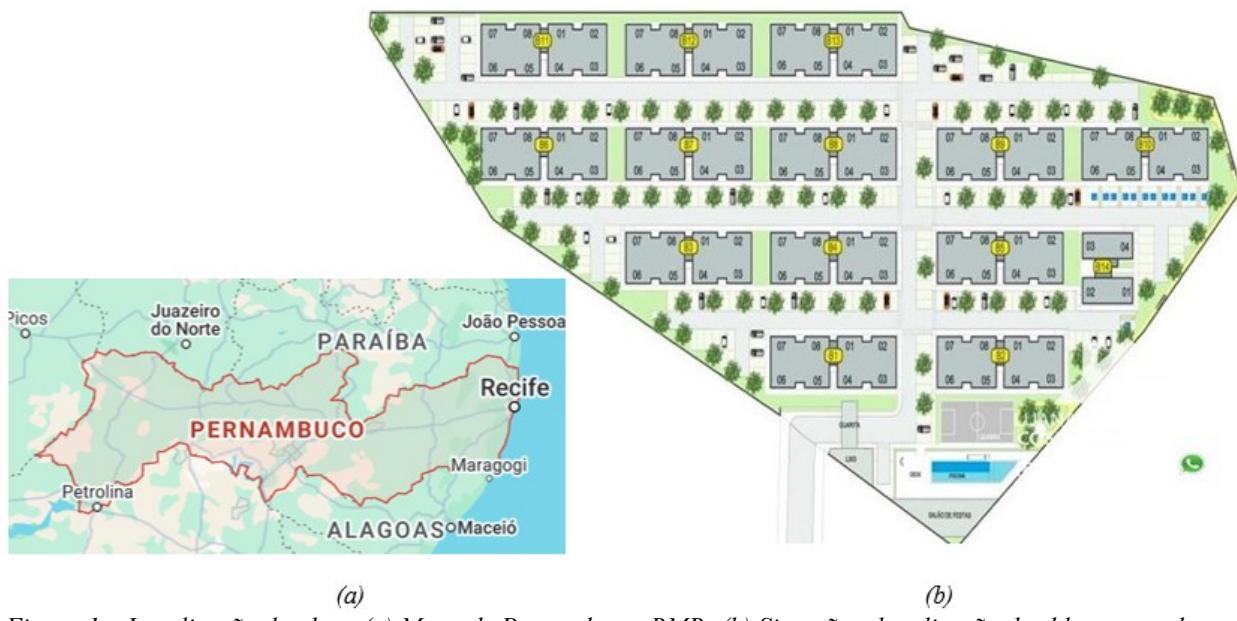


Figura 1 – Localização da obra: (a) Mapa de Pernambuco, RMR; (b) Situação e localização dos blocos em planta.
Fonte: Modificado de Silva Júnior (2021).

O sistema de fundação escolhido como solução para as características do perfil dos solos foi uma estrutura composta por um elemento horizontal (radier) e elementos verticais (estacas). A transferência de carga se dá ao solo pelo radier, e pela área lateral e de ponta das estacas. Foi adotado um radier sobre base elástica considerando sua rigidez, com dimensões laterais de 40,70 x 13,60 m e espessura de 0,25 m. A solução não elimina os recalques absolutos, mas a rigidez do radier e da própria estrutura diminuem consideravelmente os recalques diferenciais. Nas Figuras 2a e 2b, tem-se a locação e armação do radier, com a marcação dos blocos de coroamento das estacas.

As estacas da fundação têm seções quadradas de 26,5 cm de lado, com sistema executivo cravado sendo do tipo pré-fabricado. Foram utilizadas 1.490 estacas com comprimentos entre 12,0 e 20,0 m, totalizando 24.265 m de estaca. Para o Bloco 03 foram calculadas 80 estacas com comprimento médio de 17,00 m (em projeto). A execução da fundação foi realizada com 82 estacas, por motivos de reforços ao rompimento na cravação de uma das estacas.

2.2 Metodologia construtiva

O processo construtivo se deu por estágios, sendo o método construtivo executado em quatro estágios por pavimento. As concretagens seguiram em estágios diagonais na ordem: Quadrante 1, Quadrante 2, Quadrante 3 e Quadrante 4 (Figura 3). A montagem de formas de aço deslizantes e as concretagens foram realizadas diariamente. Ao todo, foram 21 etapas para término da estrutura de cada bloco. Cada pavimento é composto por 4 concretagens, entre paredes e lajes.

Após a montagem da forma e concretagem do radier, tem início a concretagem de paredes e lajes na seguinte ordem para cada lâmina da estrutura:

- Etapa 1: montagem de forma e concretagem de paredes do Quadrante 1;
- Etapa 2: montagem de forma e concretagem de paredes do Quadrante 2 e montagem de forma da laje e concretagem do Quadrante 1;
- Etapa 3: montagem forma e concretagem paredes do Quadrante 3 e montagem de forma laje e concretagem do Quadrante 2;
- Etapa 4: montagem de forma e concretagem de paredes do Quadrante 4 e montagem de forma da laje e concretagem do Quadrante 3;
- Etapa 5: montagem de forma da laje e concretagem do Quadrante 4, forma e concretagem da escada.



Figura 2 – (a) Locação e (b) Armação do radier estakeado.
Fonte: Silva Júnior (2021).

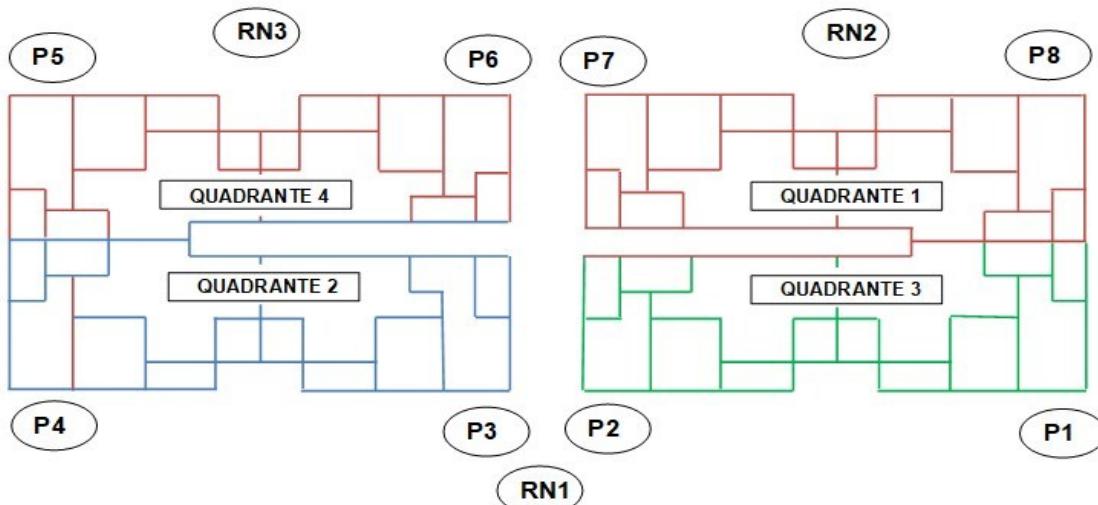


Figura 3 – Sequência construtiva e locação de quadrantes e distribuição dos pinos de monitoramento.
Fonte: Modificado de Silva Júnior (2021).

2.3 Instrumentação e monitoramento de recalques

O monitoramento dos recalques ocorreu a cada concretagem, totalizando 20 leituras para cada pino. A instrumentação foi realizada por de nível ótico, em 8 pinos de referência fixados na base do radier (Pi) e 3 pinos de referência indeslocáveis (RNi) (Figura 3). Os Quadrantes 1 e 2 tiveram os recalques medidos nos pinos P7 e P8, e P3 e P4, respectivamente. Os pinos P1 e P2 norteiam a base de dados de recalque para o Quadrante 3, assim como os pinos P5 e P6 para o Quadrante 4.

Os pinos de referência deslocáveis (Pi) foram fixados juntos ao radier e sua mudança de nível se deu através do deslocamento da estrutura de fundação. As referências indeslocáveis (RNi) foram fixadas em perfis de estacas cravadas ao solo. O monitoramento começa com a criação do nível de referência indeslocável, com o plano de cota (RNi). Posteriormente foram gerados os planos com as cotas dos pinos de referências deslocáveis (Pi), com visadas referente ao nível (RNi). Esse procedimento foi realizado em todo acréscimo de carga. Os recalques foram estabelecidos para cada pino, quando ao se medir a variação entre a cota da RNi e a cota do Pi ligado a estrutura. Observou-se as visadas referentes ao ponto de referência indeslocável RN1 e o ponto de referência deslocável P1 nas Figuras 4a e 4b, respectivamente.

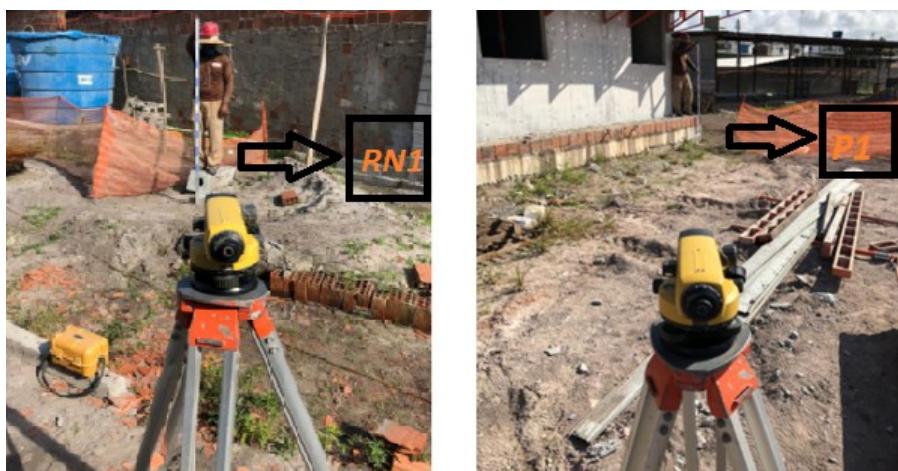


Figura 4 – Localização da instrumentação de monitoramento: (a) ponto de referência indeslocável RN1; e (b) ponto de referência deslocável P1.

Fonte: Silva Júnior (2021).

2.4 Modelagem numérica da edificação

A modelagem numérica da edificação foi realizada através do SAP2000, versão 16.0 (software para análise estrutural por Elementos Finitos - MEF). Foram utilizados os dados contidos nos projetos arquitetônico, estrutural e de fundações.

A representação final do modelo numérico da edificação para avaliação da ISE apresentou 262465 nós e 125779 elementos de áreas. Detalhes sobre a metodologia utilizada na modelagem numérica apresentada neste artigo podem ser vistos em Silva Júnior (2021).

2.5 Análises numéricas

Foram realizadas quatro análises de carregamento para a fundação baseadas no modelo clássico de fundação elástica-linear idealizado por Winkler (1867). Em cada análise, a configuração de carregamento do radier estaqueado foi modificada com a intenção de avaliar a diferença de comportamento do sistema de fundação devido a consideração, ou não, da ISE. As análises evoluem de um cenário menos realista, no qual a carga total da edificação é aplicada diretamente no radier, para um cenário próximo ao real que considera a ISE ao modelar o método construtivo (parede de concreto) combinado com o sistema de fundação (radier estaqueado). A unificação destes sistemas permite considerar a rigidez da estrutura, o número de pavimentos e a evolução construtiva no modelo numérico. As análises desenvolvidas são descritas a seguir:

- Análise 1: a previsão de recalque para fundação foi realizada através da modelagem convencional que não considera a interação solo-estrutura. Nesta análise, a distribuição linear de cargas para a fundação, realizada através das paredes de

concreto, foi aplicada diretamente no radier estaqueado. As cargas lineares variaram de 3,96 a 10,15 kN/m e foram obtidas considerando o radier livre e apoios indeslocáveis nas paredes no cálculo estrutural.

- Análise 2: a análise numérica, em elementos finitos, foi considerada a partir da união da estrutura de parede de concreto com o radier estaqueado. O radier é posto sobre apoios elásticos, sendo as estacas e o maciço de solo representados por molas. O carregamento total da superestrutura foi considerado descarregado de maneira instantânea sobre o radier.

- Análise 3: criou-se um modelo similar ao obtido na análise 2 que considera a edificação (superestrutura + infraestrutura + solo) como um sistema que trabalha de forma unificada, porém, foi considerada análise construtiva não linear, em que o edifício é modelado em estágios sequenciais de duração conhecida. Em cada estágio foi admitido a execução de uma parte da estrutura, considerando um carregamento progressivo na fundação que simula a execução real da estrutura (Figura 5), portanto, um modelo numérico mais realista para representação do comportamento da ISE.

- Análise 4: referente aos resultados do comportamento da estrutura de fundação em consequência ao efeito da evolução construtiva, com relação ao número de pavimentos e método construtivo. Estes resultados foram obtidos a partir do monitoramento de recalque, realizado durante a execução da obra.

Neste artigo são apresentados os resultados obtidos nas análises 3 e 4. Resultados das demais análises são apresentadas por Silva Júnior (2021).

2.6. Retroanálise do módulo de elasticidade do solo

O módulo de elasticidade do solo foi estimado utilizando a Equação (1). Foram aplicadas duas considerações: a interação radier-solo e a interação estaca-solo.

$$E_s = q \cdot B \cdot \frac{1-v^2}{w} \cdot I_s \cdot I_h \cdot I_d \quad (1)$$

Sendo: v : coeficiente de Poisson; E : módulo de elasticidade; B : menor dimensão do elemento; I_s : fator de forma do elemento de fundação; I_h : fator de espessura da camada compressível; I_d : fator de embutimento da camada; q : carga da estrutura; w : recalque da estrutura.

O coeficiente de reação vertical (K_v) foi estimado pela Equação 2 e coeficiente de mola do solo-radier (K_{mo}) obtido pelo produto de K_v pela área de fundação.

$$K_v = \frac{E_s}{w \cdot B \cdot (1-v^2) \cdot I_s \cdot I_h \cdot I_d} \quad (2)$$

As propriedades do solo correspondentes à estaca-solo partiram da análise do ensaio de prova de carga feito para uma estaca modelo e por meio de equações aproximadas com as características dos perfis de sondagens SPT.

3. Resultados e discussão

3.1 Evolução dos recalques monitorados em campo (borda do radier)

No Quadrante 1 foram medidos recalques de 0 mm a -6 mm e de 0 mm a -8 mm para os pinos P7 e P8 respectivamente. A última medição se deu após o carregamento total da estrutura de fundação. O pino P7 apresentou um recalque final de -5mm, caracterizado por uma baixa do radier, e o pino P8 apresentou um recalque final de -7 mm.

No Quadrante 2, o pino P3 mostrou recalque oscilando entre 0 mm e -2 mm e amplitude igual a 2mm, e recalque final de -2 mm. O pino P4 apresentou recalques entre 0 mm e -3 mm. Estes pinos possuem um comportamento semelhante, mostrando que para pinos de mesma região de estágios, existem características comuns norteadas ao processo construtivo.

No Quadrante 3 tem-se uma característica de oscilações dos recalques em valores positivos e negativos. Estas variações são governadas pela sequência construtiva, uma vez que os pinos P1 e P2 estão localizados na fase intermediária das quatro etapas construtivas. No pino P1 verifica-se levantamento do radier em metade do tempo de monitoramento. A estrutura chega a última concretagem com deslocamento vertical igual a zero. A variação de recalques do pino P1 foi de -2 mm a 2 mm. O comportamento do pino P2 tem seu recalque sempre abaixo do nível de referência, sendo possível concluir que o deslocamento é sempre negativo para a referência tomada. Os recalques variam de 0mm a -4mm.

Os pinos P5 e P6 localizados no Quadrante 4, que corresponde a última concretagem executada para todos os carregamentos do radier, mostraram comportamento de levantamento da estrutura de fundação. Os deslocamentos para os pinos são todos positivos, variando de 0 mm a 3 mm. No fim dos estágios construtivos, o comportamento da estrutura foi caracterizado como levantado. Ao término das medições, o radier permaneceu elevado na posição de 3mm.

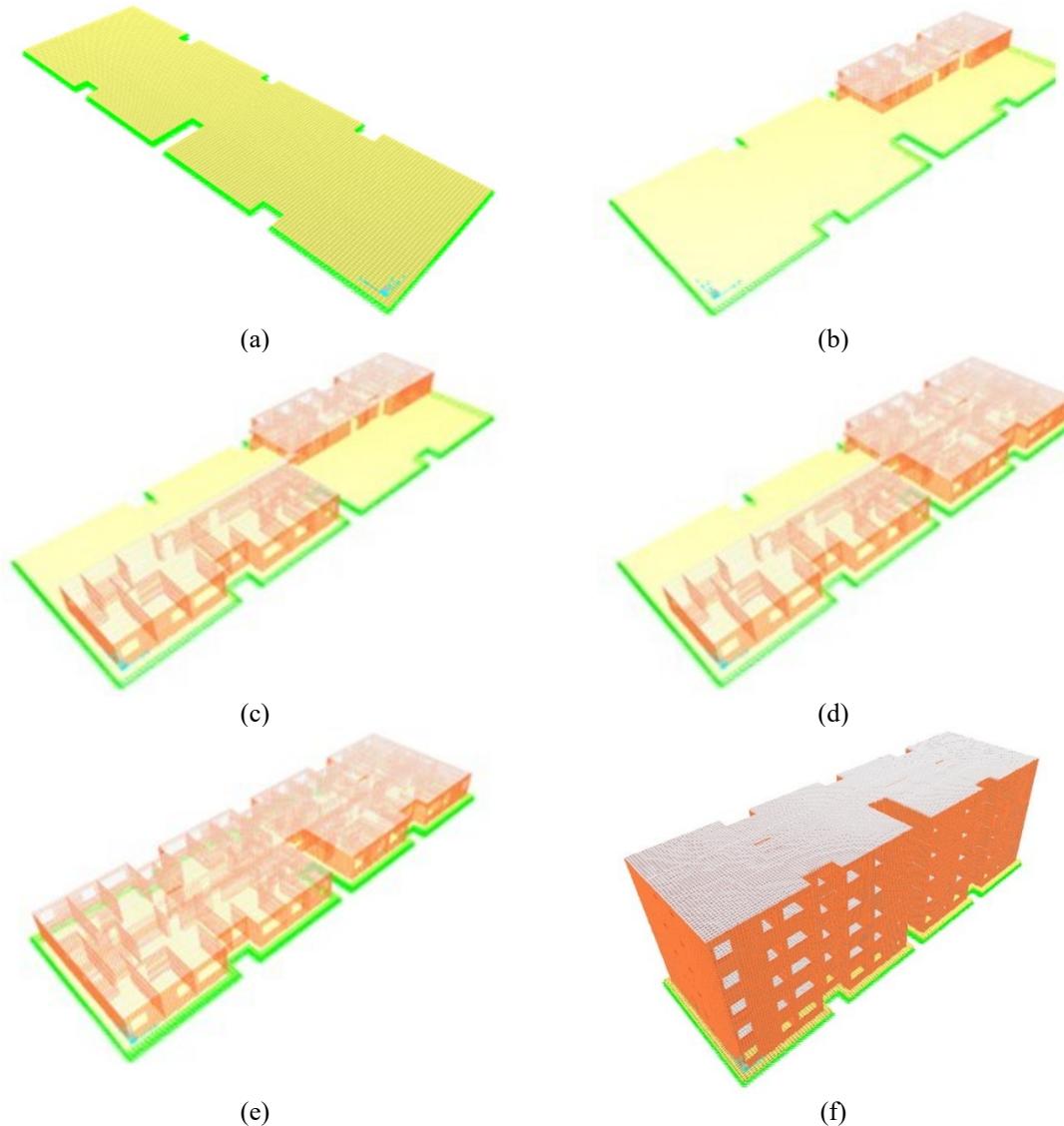


Figura 5 – Modelo numérico por estágios de construção: (a) radier; (b) Quadrante 1; (c) Quadrante 2; (d) Quadrante 3; (e) Quadrante 4; e (f) final da construção.

Fonte: Silva Júnior (2021).

Os resultados de recalque mínimos, médios e máximos obtidos em cada pino de monitoramento de campo são apresentados na Tabela 1. Nos pinos P5 e P6 tem-se valores positivos na análise individual dos recalques e em todos os parâmetros estatísticos, comprovando seu comportamento de levantamento da estrutura do radier para a região do terceiro quadrante. Os valores obtidos em P1, P2, P7 e P8 situaram acima das maiores de amplitudes de recalques médios, comportamento causado pelo processo construtivo (Figura 6). São os pinos com valores de mínimos fora do padrão do restante da curva, com valores positivos no P1 e valores muito negativos próximos do máximo, mudando o comportamento da curva de amplitude. Patrício *et al.* (2024) encontrou comportamento semelhante de recalque em radier estaqueado e

afirma que a execução parcial dos pavimentos tende a rotacionar a placa de radier e que o aumento da rigidez da estrutura conforme avanço construtivo diminui os efeitos dessa rotação.

É possível observar a trabalhabilidade da placa de radier através da amplitude dos valores de recalques medidos. A variação entre valores positivos e negativos indica a movimentação dos pinos durante o período de monitoramento e, associado a esse movimento, o trabalho da placa de radier. Para o sistema construtivo parede de concreto, a análise da estrutura em relação aos recalques mostra oscilações para o ponto de origem referenciado, sendo representado pelo eixo zero, que corresponde a primeira medição. O radier tem seus deslocamentos variando entre recalques e levantamentos em relação a origem. Os levantamentos ocorreram nos pinos P1, P5 e P6, já os pinos P2, P3, P4, P7 e P8 tiveram seus deslocamentos caracterizados como recalques.

Tabela 1 – Valores de recalques mínimos, médios, máximos obtidos nos pinos de monitoramento de campo.

Recalques dos pinos (mm)			
Pino	Máximo	Médio	Mínimo
1	-2,0	-0,1	2,1
2	-4,1	-1,9	-1,1
3	-2,5	-1,5	0,5
4	-2,2	-1,7	0,3
5	0	-1,5	3,0
6	1,6	-1,6	3,0
7	-6,4	-4,8	-1,0
8	-8,2	-6,8	-5,5

Fonte: Silva Júnior (2021).

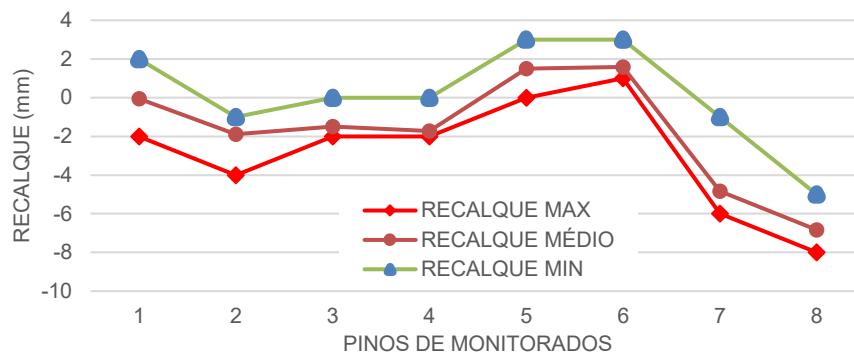


Figura 6 – Recalques mínimos, médios, máximo por pinos de monitoramento.

Fonte: Silva Júnior (2021).

3.2 Estimativa de recalques com o tempo a partir de simulações numéricas (radier)

O comportamento do radier em relação a projeção de carregamentos ao longo do tempo, simulando as concretagens executadas diariamente na obra foi analisado. A Figura 7 expressa o comportamento de recalques estimados nos pinos em relação aos estágios construtivos aplicados com o tempo. Os valores de recalque para o modelo numérico com estágios construtivos crescem linearmente com a aplicação do carregamento. Para o último estágio construtivo, o valor médio de recalque foi de -4 mm. Os valores de recalques diferenciais foram menores comparados ao modelo numérico sem interação solo-estrutura. Silva Júnior (2021) e Patrício *et al* (2024) afirmam que o comportamento linear das curvas de recalques em relação a construção por estágios se dá pelo tipo de representação do maciço de solo (no modelo numérico elástico linear, o solo é considerado uma mola, portanto dependente do valor do coeficiente de mola).

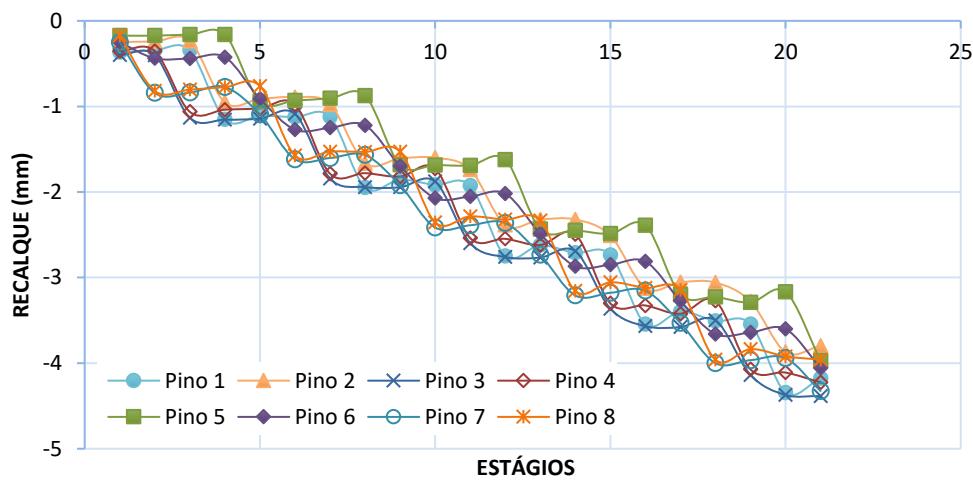


Figura 7 – Curvas de recalque médio por estágio construtivo - modelo numérico.
Fonte: Silva Júnior (2021).

Na Figura 8 tem-se as curvas do comportamento do recalque médio por estágios construtivos obtidas por modelo numérico e por monitoramento de campo. Os recalques obtidos no monitoramento de campo apresentam comportamento variável. Os pinos pertencentes ao quadrante 1 e 4 mostram um comportamento singular devido ao processo construtivo. Os recalques no quadrante 1 obtidos no monitoramento de campo tem maior amplitude em relação aos recalques obtidos no modelo numérico. O quadrante 4 mostrou levantamento da estrutura e maior diferença entre recalques monitorados e previstos pelo modelo por estágios. As variações entre o modelado e o comportamento real ocorrem principalmente por simplificações usadas na modelagem do solo.

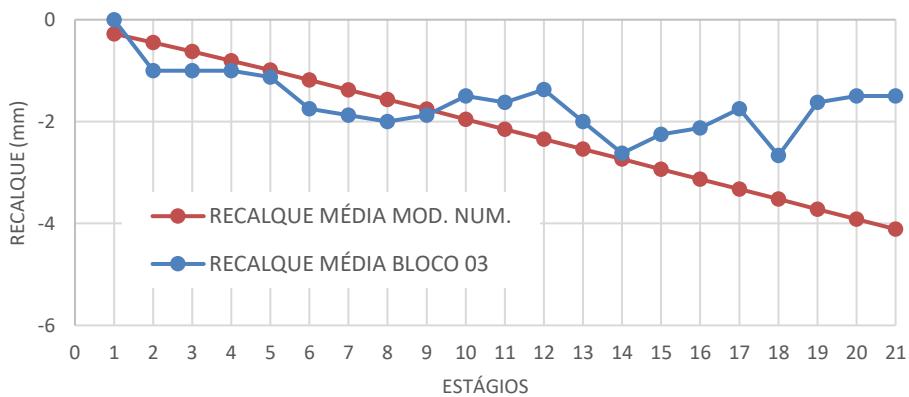


Figura 8 – Curvas de recalque médio por estágio construtivo - modelo numérico e monitoramento de campo.
Fonte: Silva Júnior (2021).

3.3 Estimativa de recalques com o tempo a partir de simulações numéricas (estacas)

Para estimar os recalques das estacas foram realizados três modelos numéricos: sem consideração da interação solo-estrutura (ISE); com consideração da ISE e sem estágios; e com a ISE com estágios construtivos. Na análise numérica sem ISE, os resultados dos recalques nas estacas localizadas no centro do radier são bem maiores do que os recalques nas bordas. Na análise numérica com ISE e sem estágios, os recalques apresentaram valores sem muita variação, consequência da rigidez da superestrutura que torna os recalques diferenciais menores. Na análise considerando a ISE e os estágios construtivos, os recalques também tiveram pouca variação de valores, mas ainda mostram-se maiores do que os recalques

da análise com ISE sem estágios, pois a construção por etapa traz esforços diferenciais possibilitando maiores distorções, entretanto, os recalques diferenciais ainda são menores se comparados com análises sem ISE (Figura 9).

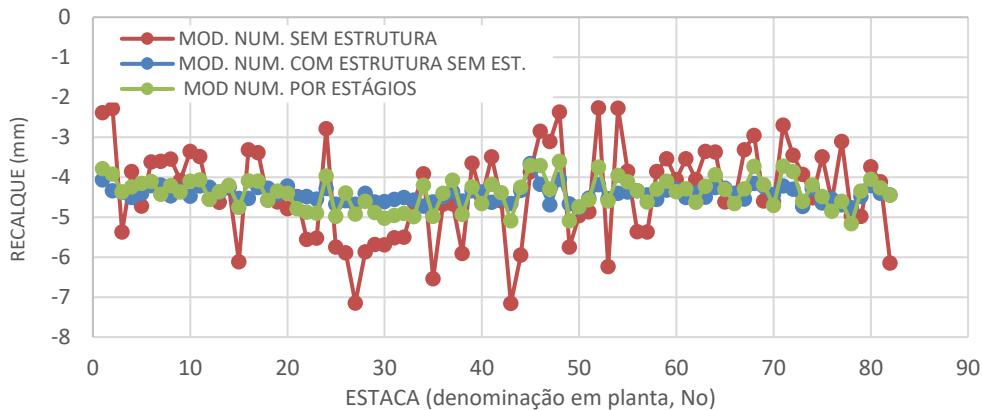


Figura 9 – Recalque das estacas - modelos numéricos.

Fonte: Silva Júnior (2021).

Os valores dos recalques médios, máximos e diferencial máximo nas estacas são mostrados na Tabela 2. As variações percentuais de recalque apresentaram valores médios de 20%, máximo de 74% e mínimo de 0%, para a análise numérica sem consideração da ISE (Tabela 3). Nota-se que a representação da ISE em projetos pode ter variações de recalques nessa ordem de grandeza devido a consideração da rigidez da estrutura e estágios construtivos. Ressalta-se que esse modelo, sem considerar a rigidez da superestrutura, ainda considera a rigidez relativa solo-fundaçao. Se os valores fossem comparados a um modelo de projeto convencional, os recalques diferenciais seriam ainda maiores. Para o modelo que considera a ISE sem estágios construtivos, observou-se uma variação média de recalque de 6 %, máxima de 14 % e a mínima de 0 %. Portanto, não considerar os estágios construtivos pode acarretar variações de recalques em projetos na ordem de 0 a 14 %.

Tabela 2 – Valores de recalques mínimos, médios, máximos e diferencial obtidos nas estacas – modelo numérico.

Recalques nas estacas (mm)			
Estacas	sem ISE /sem estágios	com ISE / sem estágio	com ISE / com estágio
Mínimo	-2,27	-3,66	-3,60
Máximo	-7,16	-4,76	-5,16
Médio	-4,38	-4,42	-4,39
Diferencial máximo	-4,89	-1,10	-1,56

Fonte: Modificado de Silva Júnior (2021).

Tabela 3 – Valores de variação percentual de recalques máximos, mínimos e médios entre os modelos.

Variação de recalques nas estacas (%)		
Estacas	sem ISE / sem estágios	com ISE / com estágio
Mínimo	0	0
Máximo	74	14
Médio	20	6

Fonte: Modificado de Silva Júnior (2021).

3.4 Análise do comportamento da fundação para o modelo por estágios (radier + estacas)

O comportamento das estacas foi analisado quanto a redistribuição de cargas com os avanços construtivos. Com o passar do número de pavimentos existe um acréscimo de carga observando cada estaca individualmente, assim, a relação passa a não ser linear com o aumento do número de pavimentos. Na Figura 10 é mostrado o comportamento de cada

pavimento com a evolução construtiva em relação a seus esforços transmitidos às estacas. No quarto pavimento, os esforços nas estacas passam a ter uma menor variação, indicando estabilização dos esforços com o avanço construtivo. Nota-se a uniformização dos valores de esforços com as linhas de tendências criadas para cada pavimento.

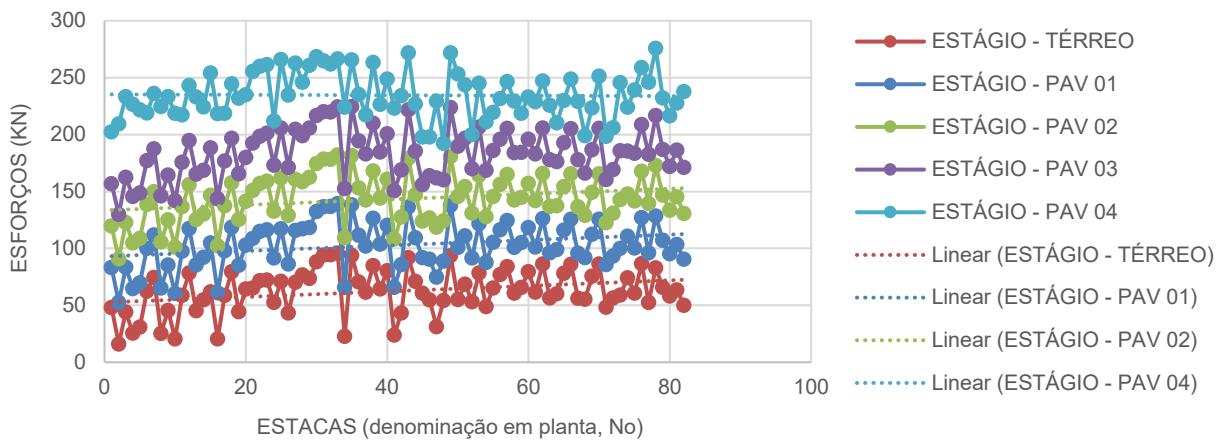


Figura 10 – Distribuição dos esforços nas estacas por estágios construtivos.

Fonte: Silva Júnior (2021).

Nas Figuras 11 tem-se os recalques da estrutura de fundação em relação aos estágios construtivos. As análises do comportamento comprovam a importância da metodologia construtiva no desempenho do radier estaqueado, credibilizando tanto o modelo numérico, quanto os levantamentos realizados campo.

Para o modelo considerando os estágios construtivos, os valores em relação a transmissão de esforços de cada elemento da fundação (estaca ou radier) para o solo, em termos de porcentagem foram cerca de 62 % das cargas são transmitidas às estacas e cerca de 37% ao radier, mostrando um bom aproveitamento da estrutura de fundação em radier estaqueado.

Na Figura 12 é apresentado o comportamento da estrutura de fundação em 3D para o primeiro estágio construtivo. Nota-se uma grande distorção da placa do radier devido ao processo construtivo adotado. Os valores de recalque são dos dados obtidos com o monitoramento em campo.

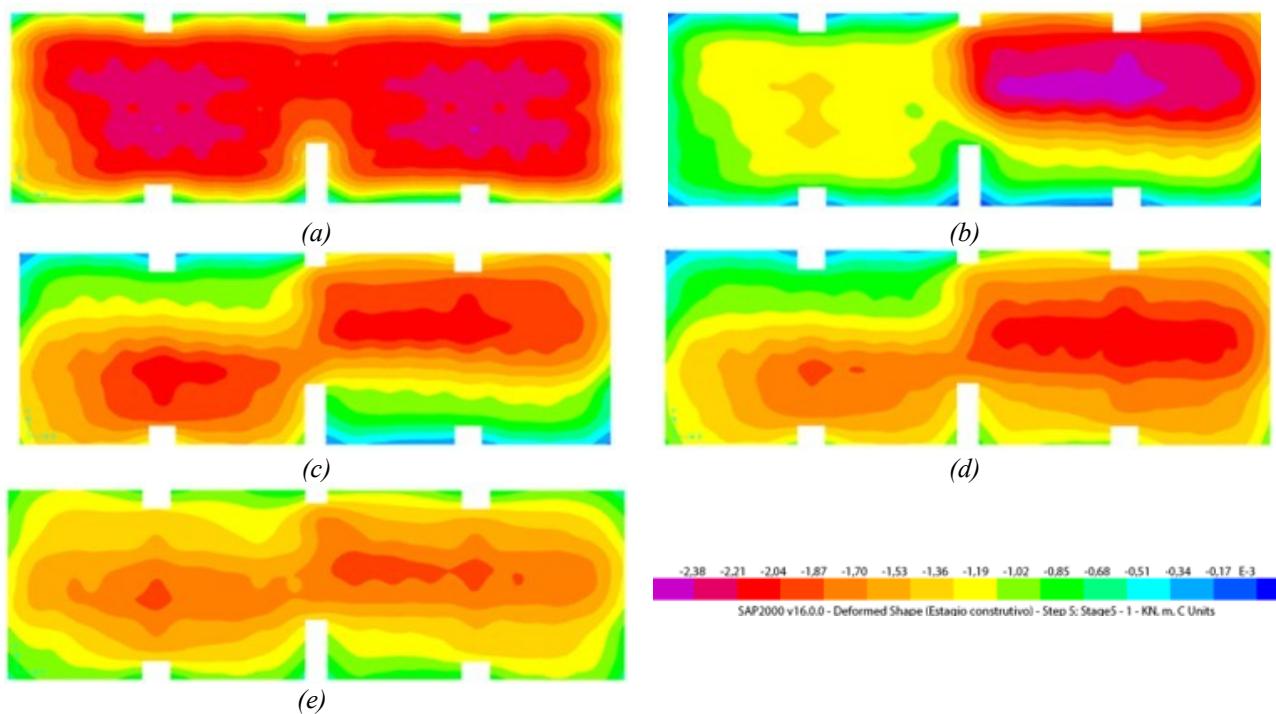


Figura 11 – Recalque da fundação em relação aos estágios construtivos: (a) Sem concretagem; (b) Quadrante 1; (c) Quadrante 2; (d) Quadrante 3; (e) Quadrante 4.

Fonte: Silva Júnior (2021).

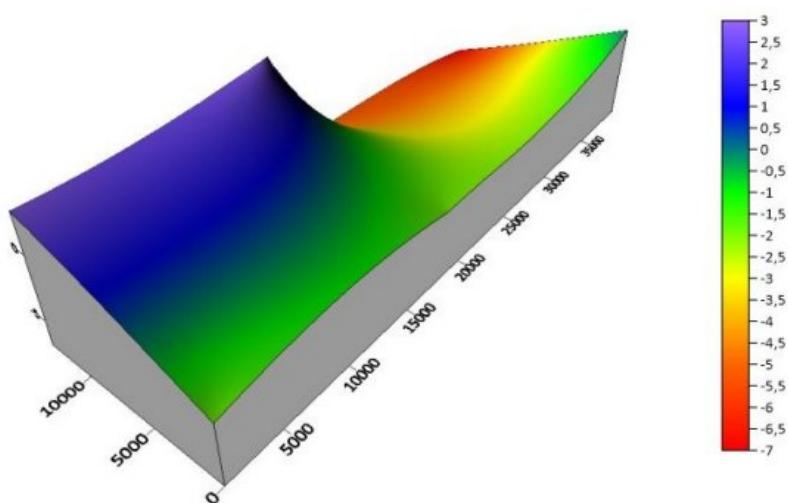


Figura 12 – Comportamento da estrutura de fundação para o primeiro estágio construtivo.

Fonte: Silva Júnior (2021).

Patrício *et al.* (2024) relatou que uma abordagem não linear para modelagem de construção e interações solo-estrutura mostrou que as obras de terraplenagem no início da construção tinham um papel significativo nos recalques. Os autores constataram que a construção parcial dos pavimentos foi considerada crítica em termos de distorções angulares e tensões no radier. O levantamento parcial do radier apresentado nos estágios de construção demonstra a importância de avaliar o comportamento da fundação nesta fase.

4. Considerações finais

A partir das medições de recalques em campo foi possível acompanhar o comportamento da estrutura de fundação. O recalque médio do radier foi de -1,7 mm. No Quadrante 1 foram medidos os maiores valores de recalques (na ordem de -8 mm), consequência do processo construtivo, com execução parcial da edificação, pois as primeiras concretagens não existem nenhuma rigidez da estrutura. O monitoramento por estágios evidenciou, em termos de deslocamento, a relação entre o número de pavimentos e a ISE, mostrando que com o aumento da rigidez da estrutura, as variações de recalque diminuem significantemente, com redução de recalques diferenciais máximos variando de 13 mm para o terreo, a 3 mm no quinto pavimento. Os recalques no Quadrante 4, que corresponde a última concretagem de pavimento, apresentou valores negativos, indicando levantamento da placa do radier. Esse comportamento mostra-se relevante para o entendimento do desempenho da estrutura em relação a distorções angulares e esforços adicionais ao processo construtivo, portanto, é evidente a necessidade de avaliação e estudo em torno a evolução construtiva em projetos com execução parcial.

As análises em relação aos comportamentos dos recalques nas estacas foram realizadas sem consideração da ISE, com consideração da ISE / sem estágios e com a ISE / com estágios construtivos. A análise sem consideração da ISE mostrou variações maiores em relação à demais, com recalque diferencial máximo de 4,89 mm. As análises considerando a ISE sem e com estágios construtivos resultaram em recalques na ordem de 1,10 mm e 1,56 mm, respectivamente, comprovando a influência da ISE na diminuição dos recalques diferenciais. A avaliação da redistribuição de recalques em porcentagem, em relação a análise numérica por estágios, mostrou variação média para as análises sem ISE de 20% e modelo com ISE de 6%, ambas sem considerar estágios. As avaliações a respeito do comportamento das estacas com relação a consideração ou não ISE, comprova o quanto pode variar o estado de tensões e comportamento da estrutura, mostrando a sua importância mesmo em projetos de edifícios de até cinco pavimentos, onde a norma NBR 16055:2012, diz não ser obrigatória.

No comportamento radier + estacas, as análises considerando os estágios construtivos mostraram valores em relação a transmissão de esforços de cada elemento da fundação para o solo. As estacas receberam 62% das cargas transmitidas e o radier recebeu 38%, mostrando um bom aproveitamento da estrutura de fundação em radier estaqueado.

O monitoramento de recalques se apresenta como um instrumento muito importante para questões de segurança em relação ao desempenho da edificação durante e após seu término e controle tecnológico em obra.

Os resultados obtidos mostram que os estágios de construção têm uma influência significativa no comportamento das fundações em radier estaqueado, contradizendo uma suposição comum do projeto. Este estudo destacou que ignorar esses aspectos no projeto de estruturas com paredes de concreto combinado com fundações em radier estaqueado pode resultar em discrepâncias consideráveis entre o comportamento estrutural previsto e real em condições de campo.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM), da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

Referências

- ALVES, L. E. S.; BELLO, M. I. M. C., SILVA JÚNIOR, R. P., PATRÍCIO, J. D., SILVA, J. P. Analysis of different scenarios load of one combined pile raft foundation. *European Academic Research Journal*, v. 13, n. 4. Disponível em: <https://www.euacademic.org/UploadArticle/5476.pdf>. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16055:2012. Parede de Concreto Moldada no Local para a Construção de Edificações - Requisitos e Procedimentos. Rio de Janeiro, 2012.
- BITTENCOURT, E. C. *Comportamento de radiers estaqueados assentes em solos arenosos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/25540>. 2018.
- FARIAS, R. S. *Análise estrutural de edifícios de paredes de concreto com a incorporação da interação solo-estrutura e das ações evolutivas*. 263p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP. 2018. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-19022019-104219/publico/TESE_ROMULOFARIAS.pdf

-
- JORDÃO JÚNIOR, J. V. M.; BELLO, M. I. M. C.; SILVA JÚNIOR, R. P.; PATRÍCIO, J. D.; SILVA, J. P. Consideração da interação solo-estrutura: influência nos recalques diferenciais e nas distorções angulares de uma fundação. *Conjecturas*, 22(2), 1471–1485. Disponível em: <https://doi.org/10.53660/CONJ-848-G11>. 2022.
- LOPES, A. C. S. *Avaliação do comportamento de edifícios de alvenaria estrutural sobre estrutura de transição considerando a interação solo-estrutura e o efeito construtivo*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/27284/1/Avaliaçãocomportamentoedifícios_Lopes_2019.pdf. 2019.
- PATRÍCIO, J. D. *Avaliação de desempenho de radiers na Região Metropolitana do Recife*. 210 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/34260>. 2021.
- PATRÍCIO, J. D.; GUSMÃO, A. D.; FERREIRA, S. R. M.; SILVA, F. A. N.; KAFSHGARKOLAEI, H. J.; AZEVEDO, A. C.; DELGADO, J. M. P. Q. Settlement Analysis of Concrete-Walled Buildings Using Soil–Structure Interactions and Finite Element Modeling. *Buildings*, v. 14, n. 746. <https://doi.org/10.3390/buildings14030746>. 2024.
- SANTOS, Y. R. P. Estudo da interação solo-estrutura de um caso de obra de edifícios com fundações em maciço rochoso. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). 174p. Universidade Federal de Pernambuco, Recife. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/31862>. 2018.
- SILVA, J. P. *Previsão de Comportamento de Fundação em Radier Estaqueado Utilizando o Método dos Elementos Finitos e Análise de Prova de Carga: Estudo de Caso*. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade de Federal de Pernambuco, Caruaru. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/40944>. 2021.
- SILVA JÚNIOR, R. P. *Avaliação da Interação Solo-Estrutura com Monitoramento de Recalques e Análise da Influência da Sequência Construtiva no Desempenho de Radiers Estaqueados*. 190 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade de Federal de Pernambuco, Caruaru, Brasil. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/43423>. 2021.
- SILVA, R. F. N.; BELLO, M. I. M. C. V.; SILVA JÚNIOR, R. P.; SILVA, J. P.; PATRÍCIO, J. D. Reliability and safety geotechnical of a combined pile raft foundation. *European Academic Research*, v. X, p. 1-18. 2020.
- WINKLER, E. *Die Lehre von der Elastizität und Festigkeit*. H. Dominicus. Prague. 1867. 388 p.