



Avaliação da Compensação em Fundação de Radier Estaqueado em Solos Residuais: Estudo de Caso de Edifício 54 Pavimentos em Goiânia

Aleones José da Cruz Junior

Doutorando, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, aleones.junior@ifgoiano.edu.br

Juan Felix Rodríguez Rebolledo

Professor, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, jrodriguezr72@unb.br

Heitor Cardoso Bernardes

Professor, Instituto Federal Goiano Campus Rio Verde, Rio Verde, Brasil,
heitor.bernardes@ifgoiano.edu.br

Renato Pinto da Cunha

Professor, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, rpcunha@unb.br

Maurício Martines Sales

Professor, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, mmartines@ufg.br

RESUMO: A necessidade de utilizar o espaço subterrâneo em projetos de edifícios altos tem resultado em escavações de múltiplos subsolos, que provocam um alívio de tensões nas camadas profundas e alteram o desempenho da fundação, resultando em diferentes comportamentos dos recalques observados, até que as cargas aplicadas sejam equivalentes ao nível de descompressão causado. Essa mudança, que resulta em diferentes inclinações na curva carga-recalque da obra, é conhecida como compensação. Este trabalho busca mostrar o efeito da compensação no comportamento de uma fundação em radier estaqueado em solos residuais do Centro-Oeste brasileiro. Para tal, foi definido um estudo de caso de um edifício alto de 54 pavimentos, sendo executado um amplo programa de caracterização geotécnica com ensaios de campo e de laboratório, e monitoradas as instrumentações de pilares e estacas, e do contato radier-solo com extensometria elétrica, e também foram medidos os recalques. Todos os monitoramentos ocorreram ao longo de todo o tempo de construção. Assim, este trabalho contribui para uma melhor compreensão do comportamento de fundações compensadas, fornecendo informações relevantes para a avaliação do comportamento dos recalques em projetos de edifícios altos.

PALAVRAS-CHAVE: Escavações, Fundações compensadas, Instrumentação geotécnica, Avaliação de recalques.

ABSTRACT: The increasing demand for utilizing underground space in the construction of tall buildings has led to the excavation of multiple basements, resulting in stress relief within deeper layers and altering the foundation's performance, consequently leading to variations in observed settlement behaviors until the applied loads reach a state of stress equilibrium. This phenomenon, known as compensation, induces distinct inclinations in the load-settlement curve of the structure. This study aims to elucidate the effect of compensation on the behavior of a piled raft foundation in residual soils of the Brazilian Midwest. To achieve this objective, a comprehensive case study was conducted involving a 54-story tall building. An extensive geotechnical characterization

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



sefe 10

program, comprising field and laboratory tests, was undertaken, and instrumentation of columns, piles, and the raft-soil interface was meticulously monitored using electrical strain gauges. Settlement measurements were recorded continuously throughout the entire construction period. As a result, this research contributes to a better understanding of the behavior of compensated foundations, providing valuable insights for the assessment of settlement behaviors in tall building projects.

KEYWORDS: Excavations, Compensated foundations, Geotechnical instrumentation, Settlement evaluation.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



Realização:



Avenida Rebouças, 353, Sala 74 A
Cerqueira César, São Paulo/SP, 05401-900
Telefone: (11) 3052-1284
E-mail: abef@abef.org.br

Organização:



Eventos Especiais

Avenida T-9, 2310 - Ed. Inove Intelligent Place
Sala B701, Jardim América, Goiânia/GO, 74255-220
E-mail: secretaria@qeeventos.com.br
Site: www.qeeventos.com.br



1 Introdução

O crescimento dos centros urbanos, impulsionado pela quantidade crescente de edifícios, tem levado à necessidade de aproveitar o espaço subterrâneo através do desenvolvimento de projetos com múltiplos níveis de subsolos e escavações de considerável profundidade. As escavações provocam uma redução da tensão vertical efetiva; essa redução faz com que o solo esteja num estado sobreadensado. Portanto, o desempenho da solução de fundação escolhida deve levar em conta o processo de escavação e as cargas removidas ou aplicadas ao solo. Ao considerar o efeito da escavação, a fundação resultante é frequentemente denominada "compensada". Zeevaert (1957) mostrou que uma fundação compensada pode reduzir significativamente os recalques ao construir edifícios em solos moles, quando comparada a uma fundação localizada na superfície ou perto dela.

Numa fundação compensada, o peso da estrutura pode ser total ou parcialmente compensado pelo peso do solo escavado, alterando o comportamento das distribuições de tensões nas camadas de solo. Essa abordagem resulta em redução dos recalques devido à melhoria da rigidez do solo. Os conceitos de compensação foram inicialmente aplicados em projetos de estruturas pesadas em solos moles, onde a remoção do solo de cobertura reduz ou elimina a consolidação do solo argiloso e seus recalques subsequentes. O conceito de compensação, onde fundações em que a escavação anterior foi considerada no projeto, também pode ser aplicado a radier estaqueados, proporcionando vantagens como menores recalques totais e menor carga nas estacas em comparação com raders não compensados, bem como recalques diferenciais reduzidos entre a fundação e o solo circundante (Poulos, 2005; Cunha et al., 2020; Poulos, 2017)

Sales et al. (2010), ao analisar o comportamento de radier estaqueados compensados, expõem que a distribuição do recalque e o compartilhamento de carga entre as estacas e o radier são dependentes de fatores como: processo de escavação; tempo entre o final da escavação e a concretagem do radier; rebaixamento do nível do lençol freático; instrumentos a serem usados para monitorar recalques, tensões e cargas, e tempo de construção. E propõem a divisão do comportamento do radier estaqueado compensado em três diferentes estágios: primeiro, onde a carga efetiva aplicada ainda está abaixo do peso efetivo de escavação, e o comportamento do solo pode ser considerado sobreadensado; segundo, quando a carga do edifício ultrapassa o peso da escavação e termina quando ocorre a conclusão da construção, onde o solo pode ser considerado normalmente adensado, mas devido à velocidade de construção os parâmetros devem ser não drenados; e terceiro, que ocorre somente em solos sujeitos a adensamento após a conclusão da construção, sendo nesse caso considerados parâmetros drenados para análise de tensões e deformações.

Tan & Zhao (2014, 2015) também mostram análises de estudos de casos de radier estaqueados compensados, onde relatam o comportamento de recompressão com diminuição dos níveis de recalque, e expõem que a consideração da compensação pode otimizar projetos, tornando mais assertivos quanto ao comportamento real do sistema de fundações.

Apesar dos diversos trabalhos já publicados sobre o tema de compensação de fundações ao longo das últimas décadas e das evidências intuitivas de melhoria de comportamento, ainda existem lacunas de conhecimento e compreensão dos mecanismos envolvidos, especialmente quando aplicamos à realidade dos solos tropicais encontrados no território nacional.

Assim, este trabalho tem o objetivo de discutir o efeito da compensação no comportamento de uma fundação em radier estaqueado de um edifício alto de 54 pavimentos em solos residuais tropicais do Centro-Oeste brasileiro, partindo de um estudo de caso, onde foi realizado um amplo programa de caracterização geotécnica com ensaios de campo e de laboratório e também de instrumentação de pilares, estacas e do contato radier-solo e com medidas dos recalques.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



2 Metodologia

O objeto de estudo deste trabalho faz parte de um projeto de pesquisa maior, no qual estão sendo desenvolvidas duas teses de doutorado pelo Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília (PPG-UnB): uma já defendida e publicada (Bernardes, 2023), e outra em fase de desenvolvimento (Cruz Junior, 2023). Assim, o estudo de caso proposto consta de uma obra localizada no bairro Jardim Goiás, em Goiânia, Goiás, no Centro-Oeste do Brasil, nas coordenadas 16°42'13"S e 49°14'02"O, conforme mostra a Figura 1 (polígono vermelho). No terreno, foi construída uma torre com 54 pavimentos, 2 subsolos e altura aproximada de 172 metros, sendo atualmente o terceiro edifício mais alto de Goiânia e um dos 15 mais altos do Brasil. A obra teve o início das escavações no primeiro semestre de 2019 e a conclusão da estrutura de concreto em março de 2022, com previsão de entrega aos moradores no segundo semestre de 2023.



Figura 1. Localização do estudo de caso.

O projeto de fundações foi desenvolvido a partir de 5 sondagens SPT e uma sondagem mista, além de três Provas de Carga Estática (PCE) no nível do segundo subsolo, que foram instrumentadas pelo projeto de pesquisa e mostraram alguma variabilidade de um lado para o outro do terreno. A solução de fundação definida em projeto foi um único radier que recebe todos os 17 pilares da torre, sobre o qual estão conectadas 241 estacas hélice contínua de 0,7 m de diâmetro e 10,8 m de comprimento. As contenções foram feitas com estacas hélice contínua justapostas de diâmetros entre 35 a 50 cm. As escavações foram realizadas em múltiplas etapas, alcançando profundidades de até 11,8 m, que corresponderam à cota de arrasamento das estacas para a base do radier. A Figura 2 mostra em planta e corte a solução das fundações, bem como as etapas e cotas de escavação.

Para o desenvolvimento das teses, foi realizado um amplo programa complementar de investigação e caracterização dos solos, com a realização de ensaios Pressiométricos (PMT), caracterização física dos solos em várias profundidades a partir da base do radier, retirada de blocos de amostras indeformadas e realização de ensaios de caracterização mecânica (ensaios de adensamento unidimensional, cisalhamento direto e triaxiais consolidados drenados e não drenados). Além disso, a partir dos resultados dos ensaios PMT, combinados com os resultados das PCE's instrumentadas, foi possível validar parâmetros geotécnicos em profundidades não amostradas por meio de análise numérica. Tal metodologia e resultados já foram publicados pelo grupo de pesquisa (Bernardes et al, 2021). As investigações complementares permitiram definir

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



melhor um perfil geotécnico representativo do terreno, conforme mostrado na Figura 3. Cabe ressaltar que, mesmo a área do empreendimento sendo relativamente pequena, foram caracterizados solos com comportamentos diferentes, o que mostra a importância da execução de uma boa investigação geotécnica.

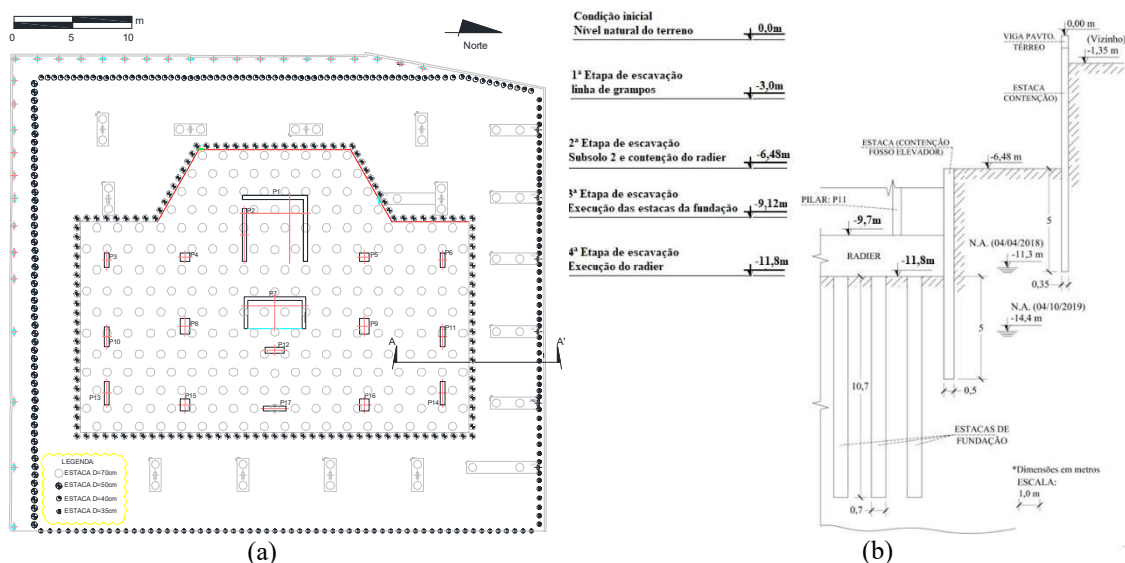


Figura 2. Fundações do estudo de caso: (a) em planta; (b) corte AA.

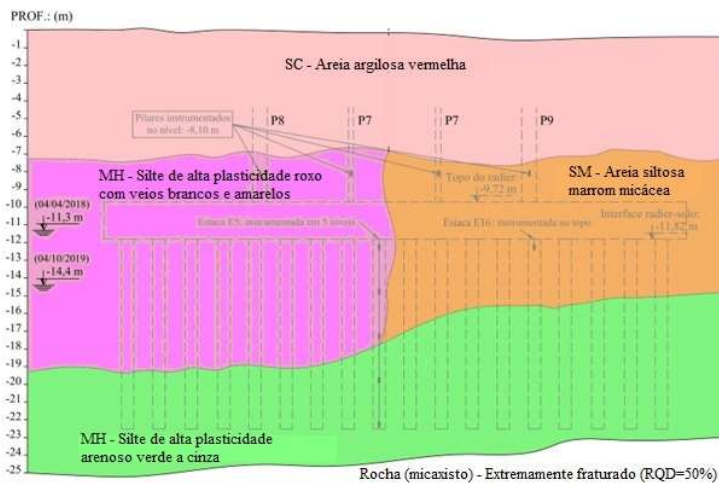


Figura 3. Perfil geotécnico do terreno.

Foi executado um amplo programa de instrumentação geotécnica, sendo confeccionados 120 instrumentos para monitoramento da obra. Foram construídos 110 sensores de imersão (SI), os quais foram inseridos nos elementos estruturais para a instrumentação das provas de carga estática, dos pilares e das estacas, seguindo a metodologia de colagem, montagem do circuito, proteção e calibração descritos em Cruz Junior (2016). Além disso, foram instaladas 10 Células de Tensão Total (CTT) na interface solo-radier, as quais foram confeccionadas seguindo os cuidados e a experiência acumulada no PPG-UnB, conforme descrito no trabalho de Pires (2021).

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



A Figura 4 mostra os sensores que foram desenvolvidos e instalados.

Todos os 17 pilares do edifício foram instrumentados com pelo menos 2 sensores, e também foram instrumentadas um total de 23 estacas, sendo 15 somente no topo e 8 estacas em cinco níveis ao longo do seu comprimento. Toda a instrumentação instalada foi monitorada ao longo de toda a construção do edifício, durante um período superior a 1000 dias (2020 a 2022), com leituras de acompanhamento de regularidade semanal. A Figura 5 mostra em planta a localização dos sensores instalados. Para o monitoramento das deformações medidas nos sensores, foi utilizado o sistema de aquisição MX840A da HBM (HBM, 2011). A partir dos resultados da instrumentação em termos de deformação, foi possível determinar as cargas e tensões nos pilares, estacas e radier, utilizando conceitos de módulo de elasticidade secante e composto (Lam, 2011). Maiores detalhes sobre a confecção dos sensores, calibração, instalação e monitoramento podem ser verificados nas teses.

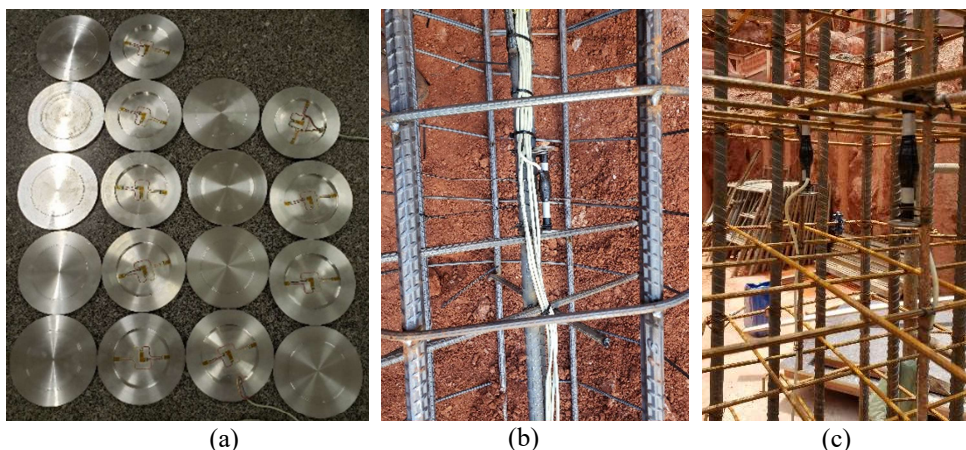


Figura 4. Sensores desenvolvidos: (a) CTT; (b) SI em Estacas; e (c) SI em Pilares.

A instrumentação de longo prazo de uma grande estrutura, como a do estudo de caso, exige vencer uma série de desafios e dificuldades, que podem enumerados: fabricação de instrumentos a partir de insumos de qualidade e resistentes ao tempo (extensômetros, adesivos e materiais de proteção); atendimento ao empreendimento dentro dos prazos e cronogramas de obra, garantindo que a instalação dos sensores e cuidados com os cabos e leituras iniciais não representem um atraso; habilidade para tratar um conjunto grande de dados durante um longo prazo; determinação de deformações acessórias advindas de fenômenos de retração e fluência, e percepção de fenômenos de drift e ressonância, sendo a redundância de sensores nos vários níveis instrumentados fundamental.

Os recalques do edifício foram monitorados nos pilares do 2º subsolo, a partir de julho de 2020 até fevereiro de 2023, totalizando 23 etapas de leitura. O início do monitoramento dos recalques foi postergado devido ao impacto das paralisações impostas no início da pandemia de COVID-19, entre março e junho de 2020. Foi estabelecido um referencial de nível profundo para a leitura dos recalques, cuja posição em planta é mostrada na Figura 5, sendo verificada ao longo das etapas a indeslocabilidade em relação a um ponto distante externo. Os recalques monitorados confirmaram uma maior deformabilidade da camada de solo MH (Figura 3), na qual o radier se apoia em parte, com uma bacia maior sobre esse solo. A instrumentação de cargas nos pilares evidenciou a redistribuição de cargas à medida que os maiores recalques foram medidos, e a estrutura se mostrava suficientemente rígida.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



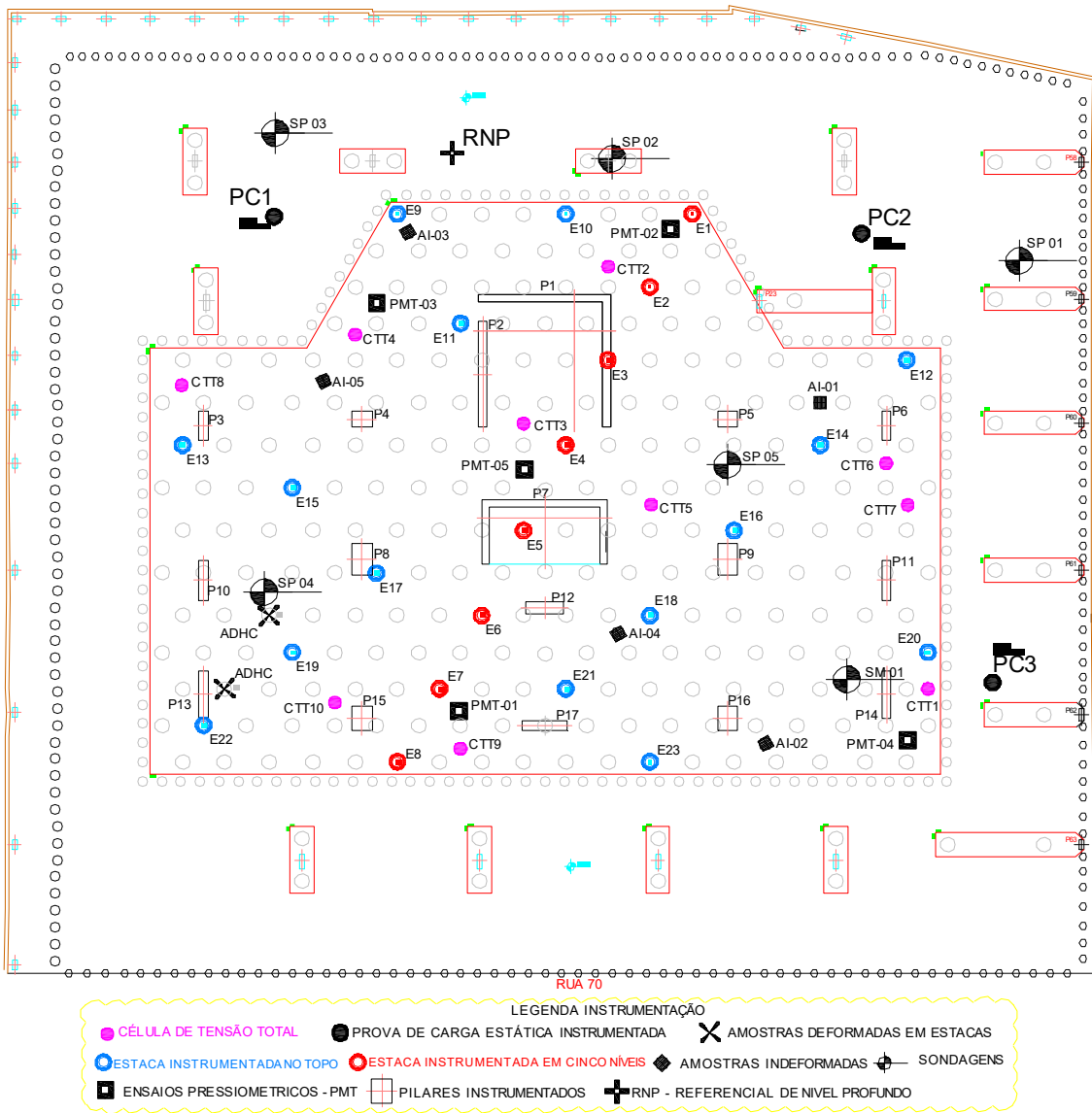


Figura 5. Radier estaqueado: posição dos instrumentos e investigações complementares.

3 Análise de Resultados

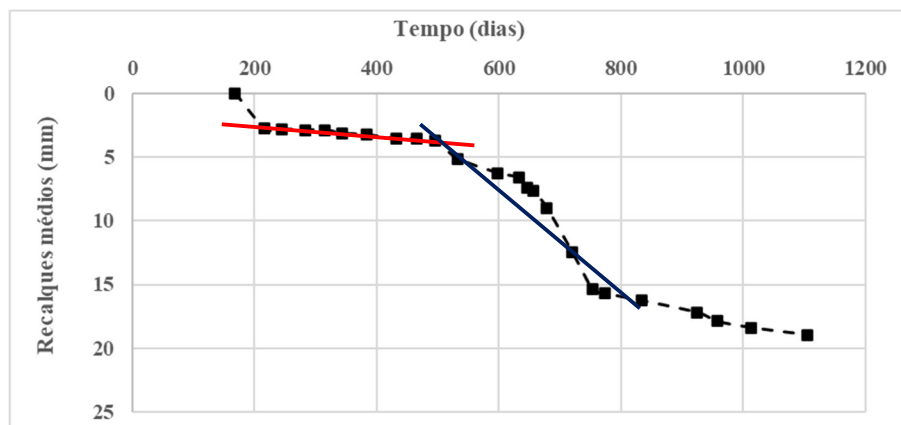
A partir dos resultados das cargas medidas pela instrumentação e dos recalques monitorados, e utilizando os conceitos demonstrados no trabalho de Sales et al. (2010), pode-se evidenciar o efeito da compensação no comportamento da fundação em radier estaqueado do estudo de caso, como mostrado na Figura 6. Nela, consta a evolução dos recalques médios monitorados nos pilares e das cargas totais medidas nos pilares do edifício, em função do tempo, o qual teve início em 31 de janeiro de 2020 e término após 1105 dias, em 09 de fevereiro de 2023.

O atraso provocado no início do monitoramento dos recalques, devido à pandemia de COVID-19, impossibilitou uma melhor determinação dos efeitos de levantamento de fundo e do trecho inicial da curva carga-recalque. Também alterou o início da curva de cargas totais medidas em função do tempo, com ocorrência de um patamar entre 40 e 130 dias. Os valores médios de

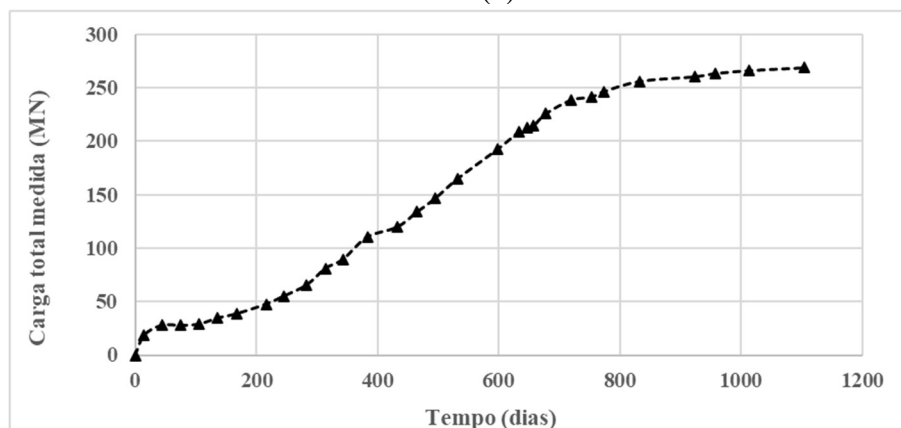
Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



recalque dos pilares, considerando os tipos de solo abaixo do radier, conduzem a maiores recalques para o solo MH em relação ao solo SM (Figura 3). No entanto, o formato e comportamento das curvas se mantêm. Por isso, optou-se na Figura 6 (a) por mostrar o valor médio geral.



(a)



(b)

Figura 6. Comportamento ao longo do tempo: (a) recalques médios; (b) cargas totais medidas

Os recalques médios apresentados na Figura 6 (a) mostram um comportamento que pode ser aproximado por uma curva trilinear, composta por três diferentes estágios (Sales et al., 2010). O primeiro estágio (reta vermelha), entre 0 e 496 dias, representa o comportamento de recompressão do solo, onde a fundação é afetada pelo efeito da compensação. O segundo estágio (reta azul), entre 496 e 833 dias, corresponde ao comportamento carga-recalque virgem da obra, quando as cargas representativas da construção ainda estão sendo aplicadas e o solo está submetido a um nível de tensão nunca antes enfrentado. O terceiro estágio, a partir de 833 dias, é caracterizado pelo recalque causado por acréscimos pequenos de carga e também pelo adensamento primário e secundário.

A carga total medida nos pilares, que representa a transição do primeiro para o segundo estágio na data de 496 dias, alcança o valor de 147 MN (Figura 6(b)). Esse valor corresponde à execução da estrutura de concreto referente ao 26º pavimento tipo, com altura de 98,46 metros, e representa 55% da carga total aplicada ao final do monitoramento. Para a determinação da carga

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



real sobre o solo de fundação, devem ser somadas as cargas referentes ao peso do radier, baldrame e complementos de pilares, chegando ao total de 194 MN. Ao considerar o peso do volume total escavado no nível do 2º subsolo, levando em conta os limites da contenção e os níveis de escavação mostrados na Figura 2, e utilizando os valores de peso específico natural determinados nos ensaios, o valor do alívio de cargas alcançaria 183 MN, que corresponde a 95% da carga limite de compensação abaixo do radier. Esse valor pode ser considerado próximo, o que evidencia a influência do efeito da compensação no comportamento carga-recalque do edifício.

A partir da compreensão do ponto limite determinado pela compensação no comportamento carga-recalque do edifício, podem ser utilizados parâmetros geotécnicos diferentes em projetos que prevejam a recompressão e, assim, melhor descrever o desempenho de obras futuras, otimizando soluções e resultando em economia.

4 Conclusões

Ao se escavar um terreno para construção de múltiplos subsolos, prática comum em construções nos grandes centros atualmente, o alívio de cargas e tensões provocados no solo alteram o comportamento da fundação. Quando esse efeito é considerado no projeto, a fundação é dita compensada. Assim, este trabalho teve como objetivo verificar o efeito da compensação de uma fundação de radier estaqueado assente em solos residuais tropicais de um edifício de 54 pavimentos, sendo possível destacar as seguintes conclusões:

- A realização de uma investigação geotécnica adequada é fundamental para obter informações precisas sobre o perfil e o comportamento do solo, pois mesmo em terrenos pequenos podem ocorrer variações consideráveis
- A instrumentação geotécnica para o monitoramento de cargas e recalques, quando aplicada em pontos de interesse, e com cuidados na sua concepção, manutenção e análise de resultados, fornece respostas primordiais para controle de obras, otimização de projetos e desenvolvimento de pesquisas.
- Foi comprovada a influência da escavação no comportamento carga x recalque do edifício como um todo. Sendo possível determinar a carga total medida pela instrumentação necessária para provocar o limite do efeito de compensação no radier estaqueado.

Como conclusão geral, pode-se afirmar que, ao considerar adequadamente o efeito da compensação em fundações, é possível obter otimização de projetos e, conseqüentemente, alguma economia. Cabe ressaltar que o presente trabalho faz parte de um projeto de pesquisa maior, no qual foram desenvolvidas teses de doutorado pelo PPG-UnB. Para maior acesso aos resultados de ensaios de campo, laboratório e de instrumentação, recomenda-se consulta desses produtos.

AGRADECIMENTOS

Ao IF Goiano Campus Trindade e ao Programa de Pós Graduação em Geotecnia (PPG) da UnB por incentivar e subsidiar o desenvolvimento desta pesquisa. Ao Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil (PPGGECON) da UFG pelo equipamento de aquisição de dados. Ao Grupo Palme / Construtora DAFE por subsidiar os custos da pesquisa e permissão na publicação dos dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bernardes, H.C. (2023). *Análise do comportamento de um radier estaqueado com base em*

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.





- instrumentação de fundação e pilares*. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-181/23, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 246 p.
- Bernardes, H.C., Sales, M.M., Machado, R.R., Cruz Junior, A.J. da, Cunha, R.P. da, Angelim, R.R. & Rebolledo, J.F.R. (2021). Coupling hardening soil model and Ménard pressuremeter tests to predict pile behavior. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(11): 5221–5240.
- Cruz Junior, A.J. da. (2016). *Instrumentação de fundações estacadas*. Dissertação de Mestrado, Publicação D0139G16, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 208 p.
- Cruz Junior, A.J. da. (2023). *Estudo experimental e numérico do efeito da compensação no comportamento de fundação em radier estacado de um edifício alto*. Tese de Doutorado (em desenvolvimento), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF.
- Cunha, R.P., Poulos, H.G. & Small, J.C. (2020). Some factors that influence the prediction of the behaviour of piled rafts via simplified (numerical) analyses. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 51(2): 22–29.
- HBM – Hottinger Baldwin Messtechnik GMBH. (2011). QuantumX. Manual. Darmstadt. 2011. 181p.
- Lam, C. & Jefferis, S.A. (2011). Critical assessment of pile modulus determination methods. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(10): 1433–1448.
- Pires, A.C.G. (2021). *Estudo experimental do comportamento de tubos enterrados reforçados com geossintéticos*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 182 p.
- Poulos, H.G. (2005). Piled raft and compensated piled raft foundations for soft soil sites. *Advances in Designing and Testing Deep Foundations*, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 214–235.
- Poulos, H.G. (2017). *Tall Building Foundation Design*. 1o ed. CRC Press, Boca Raton.
- Sales, M.M., Small, J.C. & Poulos, H.G. (2010). Compensated piled rafts in clayey soils: behaviour, measurements, and predictions. *Canadian Geotechnical Journal*, 47(3): 327–345.
- Tang, Y. & Zhao, X. (2014). 121-story shanghai center tower foundation re-analysis using a compensated pile foundation theory. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 23(11): 854–879.
- Tang, Y. & Zhao, X. (2015). Deformation of compensated piled raft foundations with deep embedment in super-tall buildings of shanghai. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 24(7): 521–536.
- Zeevaert, L. (1957). Compensated friction-pile foundation to reduce the settlement of buildings on the highly compressible volcanic clay of Mexico City. In: 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, London. *Proceedings...* Butterworth Scientific Publications, 81–86.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.

