
FUNDAÇÃO SUPERFICIAL A ELEVADA PROFUNDIDADE E COM GRANDE CAPACIDADE DE CARGA: ESTUDO DE CASO

Larissa de Santana

Leonardo Michelini

Rhuan Trujilano Corrêa Silva

Sarah Moura Leal

Paulo Afonso de Cerqueira Luz

Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM)

Resumo

As fundações superficiais em radier são geralmente utilizadas em obras de residências e edifícios de pequeno porte. O presente trabalho mostra, a partir de um estudo de caso, que é possível implantar uma fundação do tipo radier em obras de grande porte, quando o terreno em questão possui um solo de resistência considerável e compatível com os esforços solicitados. A partir de projetos e estudos de solos realizados por empresas contratadas pela obra, foi possível analisar a escolha do tipo de fundação, bem como se o solo em que está apoiada apresenta a resistência necessária. As análises resultaram na confirmação da resistência do solo de apoio, no caso argila silto-arenosa, que, por sua alta resistência (capacidade de carga), sua baixa deformabilidade e sua baixa permeabilidade, resultou na viabilização do uso do radier.

Palavras-chave: Fundação. Radier. Solo.

1 INTRODUÇÃO

Os projetos de fundações são essenciais para a elaboração e a execução de uma obra. As fundações são a base de uma estrutura e têm como objetivo suportar e transferir as cargas estruturais para o subsolo.

As fundações superficiais geralmente estão assentadas em uma profundidade duas vezes menor do que sua menor dimensão em planta, sendo utilizadas para edifícios de portes menores e com baixas cargas solicitantes, como cita a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2019) por meio da Norma Brasileira (NBR) 6122. Porém, em casos específicos, o tipo de solo existente pode viabilizar a utilização desse tipo de fundação em maiores profundidades e com cargas mais elevadas.

O solo tem um papel principal no critério de escolha do tipo de fundação a ser utilizada nas edificações, uma vez que é fundamental na concepção do projeto e deve, juntamente à fundação, atender aos requisitos de segurança contra a ruptura. No caso, quando o solo é argiloso, observa-se uma maior resistência, sendo considerado um dos solos mais seguros para a construção civil quando apresenta uma consistência de média para cima.

No Brasil, atualmente, o estudo destinado a radier é pouco difundido, tendo em vista que não existem normas que adequem esse tipo de fundação a grandes edifícios. Todavia, o projeto de fundação deve ser compatível com os recalques que a construção pode suportar para evitar problemas estruturais e de utilização.

O presente artigo tem como objetivo analisar os solos com alta capacidade de tensão admissível – capazes de suportar cargas estruturais elevadas através de fundações superficiais –, com base em estudos já realizados, visando a contribuir com os conhecimentos desse sistema para futuras edificações de grande porte.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O estudo do solo é uma importante etapa no dimensionamento das fundações da estrutura, pois por meio dele, consegue-se obter dados referentes à capacidade de carga, tipo de solo, suas características, entre outros dados para a execução. Este estudo torna o projeto de fundação mais eficiente e econômico.

É possível obter dados que possibilitam alternativas viáveis para os projetos em estudos geotécnicos. Quando se tem o devido estudo do solo, as fundações superficiais podem se tornar alternativas viáveis para grandes edifícios, mesmo que pouco usuais.

2.1 Classificação e características do solo

“O objetivo da classificação do solo, [do] ponto de vista de engenharia, é poder estimar o provável comportamento do solo ou, pelo menos, orientar o programa de investigação necessário para permitir a adequada análise de um problema” (PINTO, 2006, p. 63). Não identificadas as características do solo, podem ocorrer problemas na infraestrutura, que podem levar a uma correção onerosa e complexa, sendo extremamente prejudicial para a superestrutura do empreendimento, conforme dito por Alva (2007).

Os principais tipos de solos são os argilosos, siltosos e arenosos e tal classificação é feita com base em diversos fatores: “A classificação de um solo é obtida a partir da avaliação dos dados morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos do perfil que o representa” (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2018, p. 107).

Os solos argilosos são caracterizados pela granulometria (diâmetros microscópicos), pela alta compactação, pela maior umidade e pela baixa permeabilidade. Os solos siltosos são bastante leves, soltos, e não apresentam grande capacidade de compactação. Já os solos arenosos têm uma granulometria com diâmetros maiores, apresentam pouca umidade e alta permeabilidade.

2.1.1 Solo argiloso

Os solos classificados como argilosos são aqueles com uma presença de argila superior à de areia e silte. A argila é formada por grãos pequenos, os menores entre os referidos tipos de solo. Esses grãos são bem coesos entre si em decorrência das forças de atração eletrostática que existem entre os grãos do solo e a água dos vazios, visto que os grãos retêm muita água devido à sua plasticidade e ao fato de que a argila não precisa estar saturada (com 100% de água nos vazios).

Referente aos solos argilosos, Januário (2019) afirma que a presença da argila no solo torna-o mais fino e fortemente ligado, garantindo que o terreno tenha um alto nível de compactação natural. O terreno argiloso é extremamente rígido na prática, sendo assim, é considerado um solo bem seguro para a construção civil, desde que tenha uma consistência média ou superior.

Januário (2019) também relata que a presença do solo argiloso exige diversos cuidados na construção civil, pois, com a adição de água, pode haver riscos na execução das fundações, principalmente perante a presença de lençol freático, ou em locais com grande incidência de chuva.

2.2 Sondagem

A sondagem é um ensaio que consiste em caracterizar o solo, analisar e classificar suas camadas e determinar resistência e localização do lençol freático, se houver. Como se trata de uma das primeiras etapas de estudo, é, assim, um pré-requisito no projeto de fundações. Existem diversos tipos de sondagem no solo, como a sondagem a trado, rotativa, mista, geofísica e, por fim, a sondagem a percussão, que será apresentada a seguir.

2.2.1 Ensaio de sondagem a percussão

A sondagem a percussão, através da qual é realizado o ensaio de penetração padrão (*standard penetration test* – SPT), é um método de investigação geológica-geotécnica comumente aplicada na etapa de estudos de projeto de obras. A ABNT (2020), por meio da NBR 6484, detalha etapas, procedimentos, limitações e critérios que definem o ensaio e seus resultados. Os objetivos do SPT são verificar a resistência dinâmica à cravação do solo, recolher amostras para reconhecimento do solo e definir camadas estratigráficas e posição do nível freático. A sondagem a percussão é executada em três etapas: perfuração, medição da resistência à penetração e amostragem.

Segundo a ABNT (2020), por meio da NBR 6484, a medição da resistência à penetração é realizada por meio do número de golpes correspondente à cravação dos últimos 30 cm do amostrador-padrão, após cravação inicial de 15 cm, utilizando-se martelo de 65 kg de massa. O índice de resistência à penetração (N_{SPT}) é a soma do número de golpes para a segunda e a terceira etapas de penetração de 15 cm. Quando a penetração for superior a 45 cm, o resultado da cravação pode ser expresso em forma de fração, com base na respectiva penetração.

Os resultados do ensaio devem ser registrados no relatório de campo e, posteriormente, no relatório definitivo, que contém os resultados da sondagem. O relatório de sondagem é uma ferramenta importante para elaboração do projeto, incluindo informações como localização do lençol freático. O índice de resistência à penetração pode ser relacionado com as propriedades dos solos e expectativa de comportamento, por meio de diversas correlações empíricas.

2.3 Tensão admissível

A determinação da tensão admissível, ou capacidade de carga do solo, baseia-se em verificar e estimar o limite de carga (tensão de compressão) que o solo pode suportar sem provocar rupturas e danos estruturais ou apresentar recalques excessivos. De acordo com a NBR 6122 da ABNT (2019), é possível determinar a tensão admissível por meio de três recursos: métodos semiempíricos, métodos teóricos e prova de carga sobre placa.

Os métodos semiempíricos baseiam-se nas propriedades dos materiais e relacionam resultados de ensaios, como o SPT. De acordo com Araújo, Gomes e Ayres (2020), é comum adotar-se o método semiempírico para determinar tensão admissível de projetos de fundações superficiais, observando-se o resultado do índice de resistência à penetração.

Algumas fórmulas correlacionam o índice de resistência à penetração do SPT para casos específicos, como sapatas, tipos de solos e intervalo de N_{SPT} . De acordo com Teixeira (1996 *apud* CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011), a fórmula abaixo obtém a tensão admissível para fundações superficiais por sapatas, sem distinção de solo.

$$\sigma_{adm} = \frac{N_{SPT}}{50} \text{ (MPa) com } 5 \ll N_{SPT} \ll 20 \quad (1)$$

em que:

σ_{adm} – tensão admissível;

N_{SPT} – índice de resistência à penetração.

Outra fórmula, segundo Mello (1975 *apud* CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011), pode ser usada sem distinção de solo, mas contém intervalo menor para o N_{SPT} .

$$\sigma_{adm} = 0,1 (\sqrt{N_{SPT}} - 1) \text{ (MPa) com } 4 \ll N_{SPT} \ll 16 \quad (2)$$

Os métodos teóricos baseiam-se nas características de compressibilidade e resistência ao cisalhamento do solo, entre outras propriedades. Segundo a NBR 6122 da ABNT (2019), é calculada a capacidade de carga à ruptura, e a partir desse resultado é obtida a tensão admissível com base em coeficientes de segurança. O método conta com várias formulações, entre elas, as teorias de Terzaghi, Vesic, Meyerhoff e Skempton.

Outro método usado para dimensionar capacidade de carga do solo é o de prova de carga *in situ*. O método consiste em relacionar os resultados do modelo protótipo e as camadas de solo influenciadas. É um método prático que procura reproduzir o comportamento da fundação e, assim, obter a tensão admissível.

2.4 Concepção de um projeto de fundações superficiais

2.4.1 Fundações e suas classificações

As fundações fazem parte da infraestrutura das edificações, tendo como principal função a transferência de cargas para o solo de maneira que não ocorra uma ruptura. As cargas da estrutura podem ser distribuídas pela base da fundação e/ou pela sua superfície lateral para o solo, dependendo do tipo de fundação utilizado.

As fundações estão divididas em dois grandes grupos:

- a) fundações superficiais (também chamadas de diretas ou rasas);
- b) fundações profundas.

As fundações superficiais geralmente são localizadas a uma profundidade duas vezes menor que a sua menor dimensão em planta ou até 3 metros de profundidade.

As fundações rasas ou diretas são assim denominadas por se apoiarem sobre o solo a uma pequena profundidade, em relação ao solo circundante. De acordo com essa definição, uma fundação direta para um prédio com dois subsolos será considerada rasa, mesmo se apoiando a 7 m abaixo do nível da rua (HACHICH *et al.*, 1998, p. 227).

A NBR 6122 da ABNT (2019) determina que as fundações profundas devem estar a pelo menos 3 metros de profundidade e são aquelas cuja profundidade de implantação é oito vezes superior à sua menor dimensão.

Existem três tipos de fundações superficiais: fundações em blocos, sapatas e radier. As fundações profundas também são divididas em três tipos: estacas, tubulões e caixões. Cada tipo de fundação possui suas características. As fundações superficiais executam a distribuição da carga do edifício para o solo por tensões aplicadas ao solo pela base da fundação, que geralmente ocupa uma grande área. Já as fundações profundas, como as estacas, executam a distribuição da carga da fundação para o solo através de duas parcelas: pela resistência de ponta, encontrada na base da estaca; e pelo atrito lateral, como se fosse um atrito da fundação com o solo, conforme explicado pela NBR 6122 da ABNT (2019).

2.4.2 Sapatas

As sapatas são elementos de fundação rígidos ou flexíveis, podendo ter formatos variados e que, diferentemente dos blocos, têm armadura em sua estrutura. Devido à distribuição dos pilares e à carga entre eles, quando ocorre uma sobreposição de sapa-

tas, é comum que se realize um projeto de sapata associada, em que as sapatas podem estar com seus centros de gravidade alinhados ou não. Caso não estejam, é necessário fazer uma estrutura para estabilizar a distribuição das cargas, denominada viga alavanca. Conforme a NBR 6122 “Sapata comum a dois pilares; a denominação se aplica também a sapata comum a mais do que dois quando não alinhados e desde que representem menos de 70% das cargas da estrutura” (ABNT, 2019, p. 8).

As sapatas são indicadas em casos em que o solo é estável e têm alta resistência nas camadas superficiais, sendo assim, podem suportar cargas mais elevadas do que radiers. São comumente utilizadas devido à execução rápida, ao baixo custo e à sua facilidade de execução.

2.4.3 Radier

A fundação em radier é caracterizada por suportar todos os pilares em uma única estrutura enterrada que distribui a carga para o solo na forma de tensões constantes. O tipo de fundação em radier é geralmente utilizado quando em uma fundação se deseja uniformizar os recalques, ou quando em uma fundação em sapatas ocorre a aproximação umas das outras e as áreas necessárias para as sapatas isoladas acabam se sobrepondo umas às outras, em planta. Velloso e Lopes (2011) afirmam que se usa radier também quando a soma das áreas das sapatas de um projeto é maior que a metade da área da construção.

Velloso e Lopes (2011) e Hachich *et al.* (1998) classificam os radiers em quatro tipos: radiers lisos, radiers com pedestais ou cogumelos, radiers nervurados e radiers em caixão. Esses tipos de radiers possuem a mesma função, diferenciados apenas em suas formas e rigidez relativa, podendo ser construídos em concreto armado, concreto protendido, ou até mesmo em concreto reforçado com fibras de aço, de acordo com Guimarães e Peter (2018, p. 38).

Fundação do tipo radier é uma solução cara, por envolver elevado custo de concreto e aço, porém pode ser vantajosa dependendo do solo do terreno. De acordo com Falconi *et al.* (2019), a solução em fundação rasa é viável quando se trata de terreno com resistência e deformabilidade compatíveis com a estrutura. O radier é vantajoso em relação ao tempo de execução, à redução de mão de obra e ao baixo custo quando comparado às sapatas corridas (DAS, 2016).

2.4.4 Rebaixamento do lençol freático

O lençol freático é o nível de água presente no subsolo. As camadas de solos encontradas abaixo desse nível se encontram saturadas e mais propícias à ocorrência de

recalques. O nível do lençol freático não é sempre constante, ele pode variar dependendo das condições de clima e do relevo do ambiente.

Na construção civil, evita-se construir a fundação abaixo do lençol freático, procurando sempre formas de rebaixar o nível de água do solo, ou proteger a fundação, a fim de que a umidade presente não danifique a infraestrutura do empreendimento. Barros (2018) afirma que, atualmente, o melhor meio para rebaixamento do lençol freático é a utilização de paredes de diafragma, que é a execução de muros de contenção, dentro do solo, abaixo do nível do lençol freático, para que a umidade não chegue à fundação. Porém, o autor reconhece que o processo de rebaixamento tem algumas desvantagens, que geram danos ao entorno da obra, ou seja, à vizinhança.

Barros (2018) explica que, entre os problemas gerados para a vizinhança, podem ocorrer trincas nas paredes e muros de divisa, afundamentos de pisos, emperramentos de portas e janelas, danos em revestimento e em tubulações, afundamentos nas calçadas e no asfalto e colapso da estrutura.

2.4.5 Recalques

O projeto de fundações deve ser elaborado considerando-se coeficientes de segurança adequados à ruptura do solo e à ocorrência de recalques excessivos. A segurança do projeto está relacionada com a aplicação de dois critérios: ruptura e deslocamentos verticais.

Os materiais sofrem deformação sempre que sujeitos a esforços. No caso do solo, os esforços verticais oriundos da estrutura causam deformações, chamadas de recalques.

Todas as fundações sofrem recalques, que são previstos na fase de cálculo, mas eles só irão afetar a construção a partir do momento em que a intensidade do recalque sofrido for maior do que o limite estipulado no projeto estrutural. Sendo assim, o recalque sofrido pode ser classificado como uniforme ou diferencial.

O recalque pode ser classificado como uniforme quando toda a fundação sofre o mesmo valor de recalque, assim toda a estrutura desce igualmente, como um corpo rígido, mantendo sua estabilidade tanto vertical quanto horizontal.

Recalque diferencial é caracterizado pelo recalque desigual da estrutura: uma parte fica mais rebaixada que a outra, podendo apresentar ou não distorção angular. É o recalque mais perigoso que uma fundação pode sofrer, pois pode causar esforços na estrutura que não foram previstos nos projetos.

De acordo com Albuquerque e Garcia (2020, p. 95), os recalques podem causar três tipos de danos – estruturais, arquitetônicos e funcionais.

3 METODOLOGIA

A metodologia de pesquisa consiste em um estudo de caso sobre as fundações superficiais de um determinado edifício, analisando-se as condições de projeto que viabilizaram essa solução em grande profundidade, como a presença de solo de alta capacidade de carga.

Com o intuito de alcançar o objetivo proposto, foi realizada uma pesquisa bibliográfica dos conceitos necessários para o desenvolvimento do trabalho. Essa etapa permite que seja realizada a fundamentação teórica para analisar e interpretar os dados do projeto de fundações.

Na sequência, foi desenvolvida uma pesquisa documental sobre o projeto executivo do edifício em questão, para coleta de informações e dos seguintes documentos:

- a) planta de forma da fundação;
- b) relatório de sondagem, bem como a tensão admissível calculada pela MG&A Consultores de Solos;
- c) perfis geológicos;
- d) projeto de fundação; e
- e) projeto de implantação.

Em seguida, com base na fundamentação teórica e na pesquisa documental, foram analisados os dados que levaram a construção das fundações superficiais a uma elevada profundidade, utilizando como exemplo e base para o estudo a fundação da Torre 4 do empreendimento.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 Descrição do local de estudo

A obra O Parque, empreendimento objeto deste estudo de caso, é conhecida por grandes quantidades de materiais utilizados na sua construção. O foco do estudo foram as fundações da Torre 4, devido à quantidade de material necessário para sua conclusão

– no radier, foram utilizados 3.048 m³ de concreto, além da utilização de concretagem em duas etapas de 300 toneladas de aço e 3.000 m³ de solo escavado.

Na Figura 1, é apresentada uma vista geral da concretagem do radier, na sua primeira etapa.



Figura 1 Concretagem da primeira etapa do radier

Fonte: Acervo da obra (2019).

O empreendimento, de mais de 40.000 m² de área construída, conta com três torres residenciais de alto padrão, tendo como diferencial suas elevadas alturas, uma torre comercial, um restaurante e um parque ao redor das torres com 10.000 m² de área, no qual serão plantadas mais de 80 espécies nativas da Mata Atlântica, para dar ao máximo a sensação de morar em um parque.

Na Figura 2, há uma ilustração do empreendimento concluído.



Figura 2 Vista do empreendimento concluído

Fonte: Acervo da obra (2019).

A obra está localizada na cidade de São Paulo, entre a rua Jacerú e a avenida Roque Petroni, no bairro do Morumbi. Atualmente, está em fase de construção da estrutura, tendo sua conclusão prevista para outubro de 2022.

O centro deste estudo será a Torre 4, denominada Pétala. A torre em questão tem 143,90 m de altura. Nela, utilizaram-se lajes e vigas protendidas, sendo seu maior diferencial o giro de 180° em seu próprio eixo no 31º pavimento, sobressaindo de sua projeção em planta balanços de 4,5 m.

Na Figura 3, está apresentada uma vista geral da Torre 4 já concluída.



Figura 3 Torre 4 concluída

Fonte: Acervo da obra (2019).

Para estudo do solo, foi realizada uma coleta dos documentos de investigações geológico-geotécnicas do subsolo do terreno, por meio da execução de sondagens a percussão. A empresa responsável pelos serviços de execução de sondagem é a Engesolos Engenharia de Solos e Fundações Ltda. As sondagens a percussão foram executadas em 2016, gerando o Relatório de Sondagens a Percussão nº 2016/0129.

De acordo com a planta chave, a Torre 4 está localizada no setor 9. Para o setor 9, foram executados três furos de sondagem (S4, S5 e S6). Na Figura 4, é apresentada uma planta-chave do empreendimento. E, na Figura 5, está apresentada a planta de locação das sondagens.

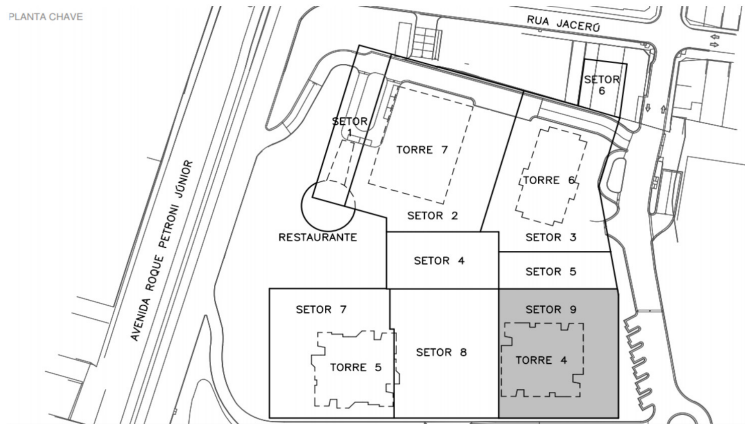


Figura 4 Planta chave do empreendimento O Parque

Fonte: França e Associados Projetos Estruturais (2019).

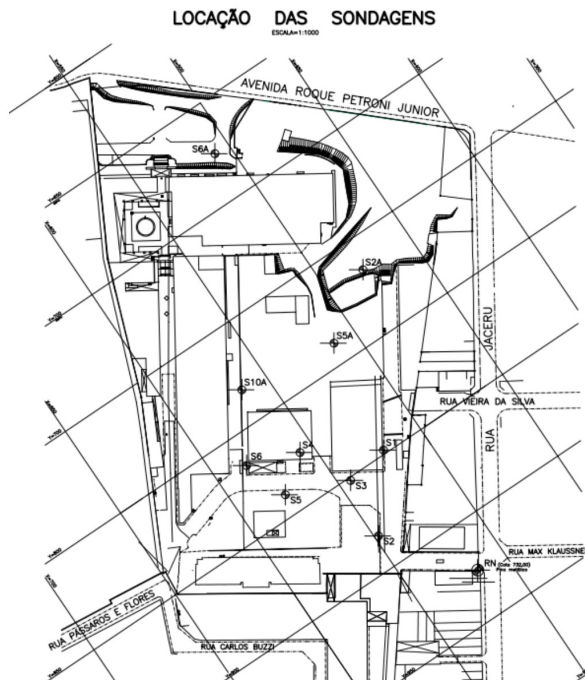


Figura 5 Locação das sondagens

Fonte: Engesolos Engenharia de Solos e Fundações Ltda. (2017).

A NBR 8036 da ABNT (1983) indica que os furos das sondagens devem ser igualmente distribuídos em planta, o que foi aplicado na execução delas. O furo S5 está localizado a 25 metros do furo S6, enquanto o furo S6 está a 27,90 metros do furo S4.

Na Figura 6, são apresentados os perfis geológicos obtidos por meio das sondagens S4, S5 e S6.

Ao analisarem-se os perfis das sondagens, verifica-se que os valores dos índices N_{SPT} são elevados, indicando alta resistência do solo. As camadas de solo são, predominantemente, argila silto-arenosa e areia de granulação variada argilosa. Nas sondagens, verifica-se que o nível de água do lençol freático varia entre 3,00 e 3,41 m de profundidade, o que pode ser considerado um nível de água elevado.

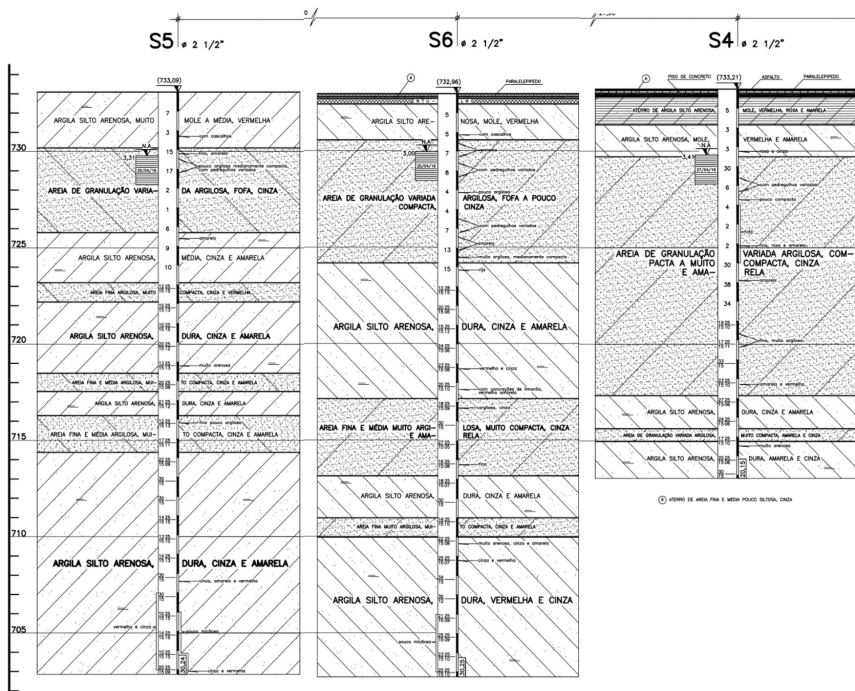


Figura 6 Perfis geológicos: sondagens S5, S6 e S4

Fonte: Engesolos Engenharia de Solos e Fundações Ltda. (2017).

4.2 Fundação do setor 9

A Figura 7 mostra a cota real da base do radier (seta vermelha) e os valores de N_{SPT} correspondentes. A Figura 8 mostra o desenho corte D, que detalha a fundação radier e a cota da base. De acordo com a Figura 8, “Cortes e detalhamentos da fundação – setor 9”, a base do radier está localizada na cota 86,44 m, no sistema topográfico local, situando-se aproximadamente a 15 m abaixo do nível do solo. A referência para as cotas do sistema local que foi utilizado nos desenhos de projeto é de 632,22 m, resultando na cota real 718,66 m para a base do radier. O radier tem as dimensões de 33 x 36 m, totalizando uma área de 1.188 m².

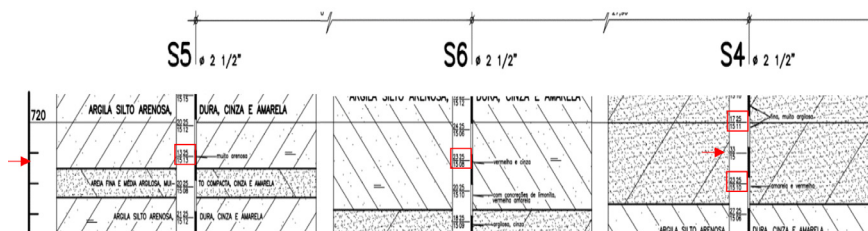


Figura 7 Perfis geológicos: sondagens S5, S6 e S4 (recorte)

Fonte: Engesolos Engenharia de Solos e Fundações Ltda. (2017).

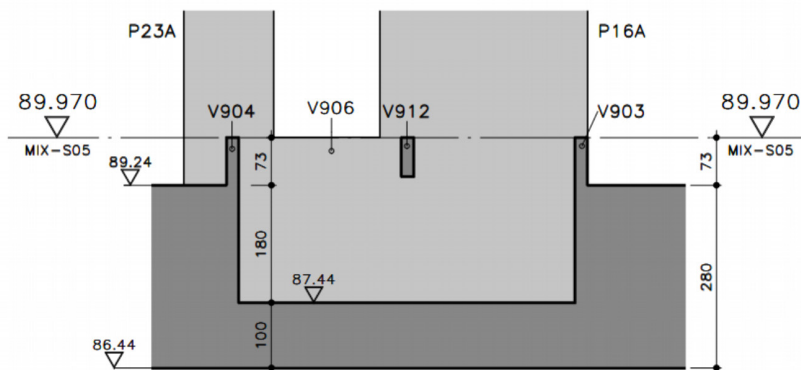


Figura 8 Cortes e detalhamentos da fundação – setor 9: corte D

Fonte: França e Associados Projetos Estruturais (2019).

Ao analisar-se a cota de base do radier com as sondagens, observa-se que:

- a) na S4, a cota de fundo do radier está na faixa de índice de resistência à penetração de 33/15 golpes. Nessa cota, o solo é uma areia de granulação variada argilosa, compacta a muito compacta, cinza e amarela;
- b) na S5, a cota de fundo do radier está na faixa de índice de resistência à penetração de 13/15 e 25/13 golpes. Nessa cota, o solo é uma argila silto-arenosa dura, cinza e amarela; e
- c) na S6, a cota de fundo do radier está na faixa de índice de resistência à penetração de 23/15 e 25/08 golpes. Nessa cota, o solo é uma argila silto-arenosa dura, cinza e amarela.

Interpretando os índices de resistência à penetração da base do radier, verifica-se que o solo apresenta alta resistência, pois os números de golpes são altos, enquanto o avanço é baixo. Por exemplo, na S4, com 33 golpes, o solo avançou apenas 15 cm.

4.2.1 Tensão admissível

Para calcular a tensão admissível do solo, será utilizado o método semiempírico, comparando-se os resultados de duas fórmulas distintas indicadas por Cintra, Aoki e Albiero (2011, p. 112).

As fórmulas (1) e (2), citadas anteriormente, correlacionam o índice de resistência à penetração (N_{SPT}), que é obtido por meio das sondagens a percussão, com os valores da tensão admissível do solo de fundação.

Tais correlações são válidas para os intervalos de valores de N_{SPT} indicados. Os valores obtidos nas sondagens a percussão executadas são bem mais elevados, em relação ao valor máximo indicado para a validade do uso dessas correlações, devido à alta resistência do solo no local do empreendimento. De forma a empregar uma abordagem aproximada, não serão considerados os limites de N_{SPT} indicados e será utilizado o N_{SPT} calculado para as sondagens S4, S5 e S6.

O valor de N_{SPT} é obtido pela soma do número de golpes na segunda e na terceira etapas de penetração de 15 cm, mas, nas sondagens em questão, nota-se que há intervalos em que não houve a penetração dos 15 cm prevista pela NBR 6484 da ABNT (2020) e, devido à alta resistência do solo, não ocorreu a terceira etapa de penetração no ensaio. Considerando esses fatores e resultados, é válido somar o número de golpes da primeira e da segunda etapas, quando possível.

Na S4, os valores de tensão admissíveis calculados são:

$$N_{SPT1} = \frac{17 + 25}{15 + 11} = \frac{42}{26} \quad (3)$$

$$N_{SPT2} = \frac{23 + 25}{15 + 10} = \frac{48}{25} \quad (4)$$

$$N_{SPTm} = \frac{42 + 48}{2} = 45 \quad (5)$$

$$\sigma_{adm1} = \frac{45}{50} = 0,9MPa = 900 \text{ kPa} \quad (6)$$

$$\sigma_{adm2} = 0,1 (\sqrt{45} - 1) = 0,47 MPa = 470 \text{ kPa} \quad (7)$$

Na S4, foram analisados os valores de N_{SPT} acima (N_{SPT1}) e abaixo (N_{SPT2}) da cota de base do radier, pois ocorreu apenas uma etapa de penetração no ensaio SPT, na cota do radier. Foi adotada uma média entre os valores de N_{SPT} para o cálculo da tensão admissível.

Na S5, os valores de tensão admissíveis calculados são:

$$N_{SPT} = \frac{13 + 25}{15 + 13} = \frac{38}{28} \quad (8)$$

$$\sigma_{adm1} = \frac{38}{50} = 0,76MPa = 760 \text{ kPa} \quad (9)$$

$$\sigma_{adm2} = 0,1 (\sqrt{38} - 1) = 0,52 MPa = 520 \text{ kPa} \quad (10)$$

Na S6, os valores de tensão admissíveis calculados são:

$$N_{SPT} = \frac{23 + 25}{15 + 08} = \frac{48}{23} \quad (11)$$

$$\sigma_{adm1} = \frac{48}{50} = 0,96MPa = 960 \text{ kPa} \quad (12)$$

$$\sigma_{adm2} = 0,1 (\sqrt{48} - 1) = 0,59 MPa = 590\text{kPa} \quad (13)$$

Interpretando os resultados dos cálculos realizados por meio das duas correlações, observa-se que a tensão admissível 1 (σ_{adm1}) apresenta valores sempre maiores que a tensão admissível 2 (σ_{adm2}). Esses resultados devem ser comparados com a carga do radier, que é de 560 kPa, estimada pela soma das cargas de todos os 49 pilares suportados pelo radier e dividida pela área do radier. A maioria dos resultados apresenta

valores de tensão admissível maiores que a carga do radier, exceto a tensão admissível 2 na S4. Considerando-se a totalidade dos valores calculados, verificou-se que o solo de fundação é capaz de suportar a carga do radier.

A empresa MGA – Consultores de Solos S/S. Ltda. foi contratada para analisar a viabilidade do projeto e atestar se o projeto de fundações, elaborado pela empresa Portella Alacron Engenheiros Associados S/S, foi dimensionado corretamente, conforme indicam os itens 9.2 e 10 da ABNT (2019), por meio da NBR 6122. O relatório concluiu que, com base nos resultados dos ensaios SPT e dos perfis geológicos das sondagens disponíveis e na grandeza dos carregamentos da estrutura, o projeto é tecnicamente correto. Particularmente na Torre 4, a MGA estimou um valor de 700 kPa para a tensão admissível do solo, o que está perfeitamente adequado.

4.2.2 Lençol freático

Para conter o lençol freático e possibilitar a construção dos subsolos na fase inicial da obra, foi empregada a execução de uma parede diafragma atirantada.

A Figura 9 mostra a execução da parede diafragma.



Figura 9 Escavação para execução das lamelas (paredes)

Fonte: Acervo da obra (2019).

Para execução do radier, não houve necessidade de nenhum método de contenção do lençol freático em decorrência do solo em que está apoiado, que é uma argila silto-arenosa, mesmo com a presença de areia em alguns pontos, como apontado na

sondagem S4. As argilas são conhecidas por apresentarem uma baixa permeabilidade, o que impossibilitou o avanço de água proveniente do lençol freático.

A Figura 10, a seguir, indica que o solo não apresentou elevados teores de umidade durante a obra, confirmando que realmente não houve a presença de água proveniente do lençol freático.



Figura 10 Escavação da base do radier – Torre 4

Fonte: Acervo da obra (2019).

Na região onde está localizada a obra em estudo, é comum a ocorrência de lençol freático com nível elevado, por estar situada na várzea do antigo curso do Rio Pinheiros, que foi retificado para evitar a ocorrência de inundações.

4.3 Fundações da periferia

Embora a estrutura principal esteja apoiada no radier, sua periferia é constituída por sapatas que sustentam pilares com cargas de até 360 tf, como a sapata S908, que recebe a carga do pilar P924. Essa sapata tem dimensões de 250 cm por 300 cm e o pilar, dimensões de 80 cm por 30 cm.

A Figura 11 mostra o projeto da sapata e a Figura 12, sua execução.

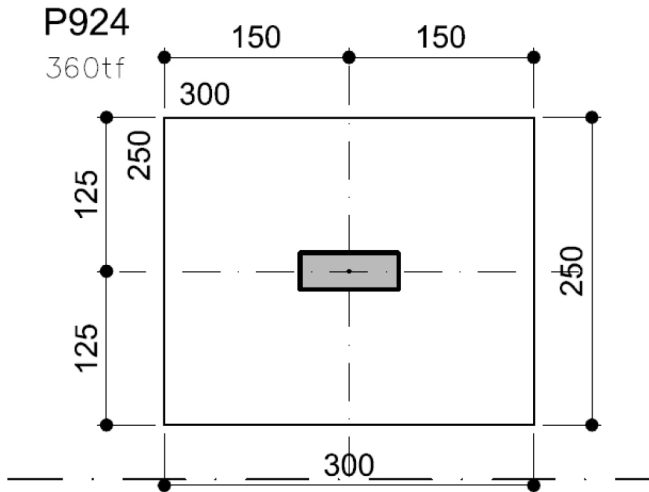


Figura 11 Projeto da sapata S908 (P924)

Fonte: França e Associados Projetos Estruturais (2019).



Figura 12 Armação da sapata

Fonte: Acervo da obra (2020).

Embaixo da sapata, foi executado um lastro de concreto magro de 5 cm para assentamento e nivelamento da sapata, cuja cota de apoio está localizada no nível de 88,77 m, correspondente à cota real de 720,99 m.

Na Figura 13, apresenta-se um corte típico das sapatas executadas na obra.

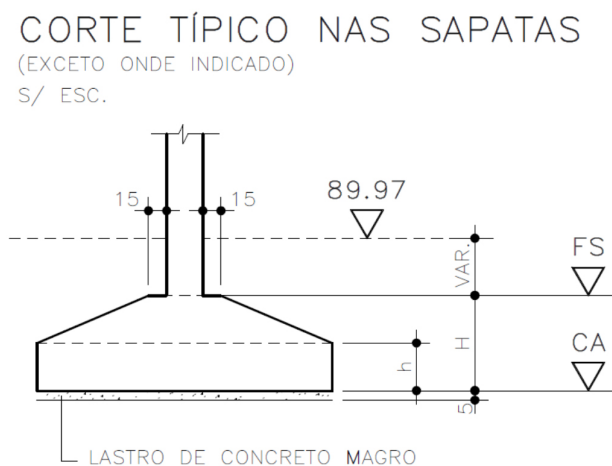


Figura 13 Corte da sapata

Fonte: França e Associados Projetos Estruturais (2019).

No caso, trata-se de uma sapata isolada retangular com uma altura de rodapé de 45 cm e uma altura total de 90 cm. Pode-se utilizar a S5 como referência, uma vez que essa está localizada mais próxima da sapata, mesmo que ainda esteja localizada onde será executado o radier.

Ao analisar-se a cota de base da sapata com a sondagem, observa-se que, na S5 a cota de fundo do radier está na faixa de índice de resistência à penetração 10/15 a 25/15 golpes. Nessa cota, o solo é uma argila silto-arenosa dura, cinza e amarela.

A partir da consideração de peso próprio da fundação, presente no item 5.6 da norma NBR 6122 da ABNT (2019), pode-se encontrar a tensão admissível do solo, por meio da área da base da sapata, quando sujeita a um carregamento vertical.

$$A = a \times b = \frac{1,05 \times P}{\sigma_s} \quad (14)$$

$$A = a \times b = 300 \times 250 = 75000 \text{ cm}^2 \quad (15)$$

$$P = 360 \text{ tf} = 360000 \text{ kgf} \quad (16)$$

em que:

a = maior lado da sapata;

b = menor lado da sapata;

P = carga do pilar.

Ao substituírem-se os dados do projeto na fórmula, obtém-se uma tensão admissível de $5,04 \text{ kgf/cm}^2$, sendo essa a tensão que o solo deveria ter para resistir às tensões da sapata. No relatório emitido pela MGA, observa-se que foi obtido um valor de tensão admissível do solo para as periferias de aproximadamente $5,00 \text{ kgf/cm}^2$, o que torna a execução da sapata viável.

Como o memorial de cálculo das tensões do solo não foi fornecido, foi necessário utilizar, para o cálculo desse valor, uma correlação pelo bulbo de tensões, em que se utiliza a média dos números de golpes presente no bulbo de tensões e, então, divide-se esse valor por 50 para se achar a tensão em MPa.

$$\sigma_{adm} = \frac{N_{spt} \text{ (médio)}}{50} \text{ (MPa)} \quad (17)$$

Substituindo os dados na fórmula, tem-se:

$$\sigma_{adm} = \frac{20 + 20 + 20 + 20 + 20 + 20}{6} \div 50 = 0,40 \text{ MPa} \quad (18)$$

Como a correlação não permite que sejam utilizados valores de golpes acima de 20, ao substituírem-se os valores de golpes sempre por 20, obtém-se uma tensão admissível de apenas $0,40 \text{ MPa}$, ou seja $4,00 \text{ kgf/cm}^2$. Visto que o solo é muito duro e todos os valores são acima de 20 golpes, foram aplicados os valores reais do N_{SPT} e, então, aplicou-se um fator de redução para que fosse possível obter um valor mais próximo do real e mais seguro da tensão no solo.

$$\sigma_{adm} = \frac{35 + 45 + 38 + 45 + 46 + 37}{6} \div 50 \times 0,70 = 0,574 \text{ MPa} \quad (19)$$

Aplicando-se uma redução de 30% de tensão, é obtido um valor de tensão de 0,574 MPa, ou seja, um valor de tensão de 5,74 kgf/cm² – valor mais próximo ao calculado pela MGA e que permite a execução da sapata na cota de projeto.

4.4 Recalques

O solo presente na base do radier é composto por uma argila silto-arenosa cinza e amarela que apresenta um alto módulo de elasticidade, conferindo ao solo uma baixa deformabilidade. Desse modo, o solo em questão não apresentou recalques expressivos, em função de apresentar alta resistência e baixa deformabilidade.

Esses fatores refletem no desempenho da fundação. De acordo com a NBR 6122 da ABNT (2019, p. 38), “O desempenho das fundações é verificado por meio de pelo menos o monitoramento dos recalques medidos na estrutura [...]”. Dependendo do projeto, outras grandezas devem ser avaliadas para monitoramento do desempenho, como deslocamentos horizontais e tensões. Esses aspectos avaliados devem ser comparados com as previsões do projeto.

As tabelas a seguir mostram o comportamento da fundação em relação aos recalques gerados no solo durante a execução do edifício. A Tabela 1 apresenta o controle dos deslocamentos da fundação pela execução de pinos instalados no topo do radier, com relação à fase de implantação (fase inicial) e ao término da execução do 10º pavimento. Na Tabela 2, o controle dos deslocamentos da fundação tem como leitura inicial a mesma fase de implantação (fase inicial) da tabela anterior, porém se relaciona com o término de execução do 20º pavimento.

As Tabelas 1 e 2 mostram os recalques sofridos.

Para efeito comparativo, foi realizada uma estimativa do valor dos recalques elásticos, admitindo-se radier de base quadrada (com largura de 33 m), rígido ($I = 0,86$), com a tensão vertical aplicada de 560 kPa, coeficiente de Poisson do solo de 0,4, módulo de elasticidade de 200 MPa, tendo sido obtido um valor de 0,067 m (67 mm) – valor bem superior aos valores medidos.

4.4.1 Uniformização dos recalques por meio do radier

Teoricamente o radier mencionado no estudo e executado na obra deveria apresentar característica flexível, por não possuir vigas de rigidez sob sua estrutura, mas devido à sua elevada espessura de 2,80 m, passa a funcionar como um elemento rígido. Assim, tende a uniformizar os recalques da estrutura, visto que a rigidez é mais elevada, não permitindo a ocorrência de recalques diferenciais.

Além disso, outro fator que colabora para a uniformização dos recalques no presente estudo é o solo existente no local, o qual, além de apresentar baixa deformabilidade, tem uma baixa permeabilidade. Devido à permeabilidade do solo, a água presente nele não é expulsa para a superfície, tornando pouco provável a ocorrência de recalques.

É possível correlacionar a uniformização dos recalques com a distribuição de cargas ao longo de todo o radier. Se os pilares estivessem apoiados em sapatas isoladas, cada uma aplicaria uma tensão diferente no solo e, conseqüentemente, cada uma iria recalcar de forma diferente; porém, com o radier, todas as cargas são distribuídas ao longo de sua área em planta, tornando a tensão no solo praticamente a mesma sobre a área inteira do radier.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O radier costuma ser associado a obras de pequeno porte e a cargas pequenas, como no caso de habitações de baixo custo. Contudo, sua utilização não pode ser limitada a essas situações. O fator essencial para determinar a segurança e a viabilidade do emprego do radier é o tipo de solo, característica fundamental no projeto da obra O Parque. O projeto apresenta diferenciais ao empregar uma fundação superficial a uma grande profundidade (aproximadamente 15 m) e adotar um radier em um edifício de 47 pavimentos, características excepcionais à utilização comum de um radier.

Ao analisarem-se os fatores que levaram à adoção do radier, conclui-se que o tipo de solo foi o fator mais importante. O solo presente no terreno permite que um radier

TABELA 1

Controle de recalque: 10º pavimento (Torre 4)

Controle de recalque – Torre 04 – 10º pavimento											
Pto	Leitura inicial (implantação)				10º pavimento – 1ª leitura				mm		
	Este	Norte	Elevação	Data	Este	Norte	Elevação	Data	ΔE	ΔN	ΔZ
T4A	992.633	5.003.746	90.883	28/02/2020	992.633	5.003.746	90.883	05/06/2020	1	0	0
T4B	999.206	4.996.598	90.875	28/02/2020	999.206	4.996.598	90.876	05/06/2020	0	-1	1
T4C	1.008.975	4.996.787	90.944	28/02/2020	1.008.975	4.996.787	90.943	05/06/2020	1	0	-1
T4D	1.019.658	5.003.776	90.957	28/02/2020	1.019.658	5.003.776	90.957	05/06/2020	-1	1	0
T4E	1.010.569	4.988.754	90.941	28/02/2020	1.010.569	4.988.754	90.941	05/06/2020	0	0	0
T4F	1.014.464	4.983.662	90.917	28/02/2020	1.014.464	4.983.662	90.915	05/06/2020	0	1	-2
T4G	1.020.909	4.976.166	90.930	28/02/2020	1.020.909	4.976.166	90.931	05/06/2020	-1	0	1
T4H	1.005.409	4.983.120	90.922	28/02/2020	1.005.409	4.983.120	90.922	05/06/2020	0	1	0
T4I	993.902	4.976.138	90.940	28/02/2020	9.939.902	4.976.138	90.940	05/06/2020	-1	0	0
T4J	1.003.211	4.983.941	90.917	28/02/2020	1.003.211	4.983.941	90.916	05/06/2020	0	-1	-1
T4K	1.002.960	4.991.603	90.882	28/02/2020	1.002.960	4.991.603	90.881	05/06/2020	0	0	-1

Fonte: Topografia.com (2020a).

TABELA 2

Controle de recalque: 20° pavimento (Torre 4)

Controle de recalque – Torre 04 – 20° pavimento											
Pto	Leitura inicial (implantação)				20° pavimento – 2ª leitura				mm		
	Este	Norte	Elevação	Data	Este	Norte	Elevação	Data	ΔE	ΔN	ΔZ
T4A	992.633	5.003.746	90.883	28/02/2020	992.631	5.003.748	90.879	16/11/2020	-2	2	-4
T4B	999.206	4.996.598	90.875	28/02/2020	999.208	4.996.601	90.872	05/06/2020	2	3	-3
T4C	1.008.975	4.996.787	90.944	28/02/2020	1.008.972	4.996.785	90.940	05/06/2020	-3	-2	-4
T4D	1.019.658	5.003.776	90.957	28/02/2020	1.019.657	5.003.779	90.954	05/06/2020	-1	3	-3
T4E	1.010.569	4.988.754	90.941	28/02/2020	1.010.571	4.988.755	90.937	05/06/2020	2	1	-4
T4F	1.014.464	4.983.662	90.917	28/02/2020	1.014.464	4.983.660	90.914	05/06/2020	-3	-2	-3
T4G	1.020.909	4.976.166	90.930	28/02/2020	1.020.911	4.976.169	90.926	05/06/2020	2	3	-4
T4H	1.005.409	4.983.120	90.922	28/02/2020	1.005.412	4.983.118	90.918	05/06/2020	3	-2	-4
T4I	993.902	4.976.138	90.940	28/02/2020	9.939.901	4.976.140	90.937	05/06/2020	-1	2	-3
T4J	1.003.211	4.983.941	90.917	28/02/2020	1.003.212	4.983.943	90.913	05/06/2020	1	2	-4
T4K	1.002.960	4.991.603	90.882	28/02/2020	1.002.963	4.991.601	90.878	05/06/2020	3	-2	-4

Fonte: Topografia.com (2020b).

suporte as cargas das estruturas, sem a necessidade de elementos de fundação profunda, como as estacas. A fundação foi assentada de forma a se aproximar de uma camada de solo mais dura e resistente, característica que pode ter sido influenciada pela presença de vários subsolos e da dificuldade de acesso de equipamentos para escavação em maiores profundidades. Nota-se que a cota de assentamento do radier coincide com valores de N_{SPT} muito elevados, evidenciados por não permitirem o avanço completo de 45 cm do amostrador. O uso do radier, nesse caso, apresenta vantagens em comparação com outras fundações, como a aplicação de baixas tensões ao solo e, conseqüentemente, menor recalque, menor tempo de execução e redução da mão de obra. Outra vantagem é a execução em zonas urbanas com alta densidade de construções, visto que o processo construtivo do radier não apresenta vibrações que possam interferir nas edificações vizinhas.

As informações analisadas e os resultados apresentados no estudo contribuem para desenvolver e incentivar o uso de radier em obras de grande porte, quando viável. A falta de norma técnica brasileira específica de radier e estudos na área interferem na disseminação de informações e dificultam a adesão desse tipo de fundação. Portanto, estudos e pesquisas constantes sobre o assunto são fundamentais, além de publicação de uma norma técnica específica, que seria de grande importância e estímulo para que seu uso seja mais difundido no mercado da construção civil. Em outros países, o radier está presente em vários projetos de elevadas edificações que podem servir como base de estudos futuros. Isso auxiliaria profissionais tanto na área de projeto quanto na de construção a utilizarem o radier com mais frequência, agregando diferenciais e valor na execução das fundações das construções.

Como indicações de pesquisas futuras, pode-se citar o uso de *softwares* relacionados ao monitoramento dos recalques de uma obra, por meio dos quais a dimensão dos recalques previstos se torna mais precisa. Ainda, pode-se realizar um estudo sobre normas de países que têm mais experiência com fundações superficiais, com o intuito de aprimorar as normas brasileiras.

SHALLOW FOUNDATION PLACED ON GREAT DEPTH WITH LARGE LOAD CAPACITY: CASE STUDY

Abstract

Shallow foundations in concrete ground slabs are generally used in houses and small buildings constructions. This article, through a case study, shows that it is possible to apply a ground slab on large construction projects when the soil presents a significant high load capacity and is compatible with the building loads. With the

projects and soil studies provided by the contractors, it was possible to analyze the choice of foundation and if the soil had the required strength. The analyses confirm that the soil, silty-sandy clay, is suitable to support the foundation, due to the high strength (load capacity), small deformation, and impermeability, resulting in the appropriate use of the ground slabs.

Keywords: Foudantion. Ground slabs. Soil.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, P. J. R. de; GARCIA, J. R. *Engenharia de fundações*. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

ALVA, G. M. S. *Projeto estrutural de sapatas*, dez. 2007. Disponível em: <http://coral.ufsm.br/decc/ECC1008/Downloads/Sapatas.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2020.

ARAÚJO, C. B. C. de; GOMES, J. K. P.; AYRES, T. M. da C. Análise da capacidade de carga de fundações superficiais por diferentes metodologias. *Revista de Ciência e Tecnologia, Boa Vista*, v. 6, p. 1-20, 2020. DOI 10.18227/rct.v6i0.5477

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *ABNT NBR 6122: projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019. 33 p.

ABNT. *ABNT NBR 6484: solo – sondagens de simples reconhecimentos com SPT – método de ensaio*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020.

ABNT. *ABNT NBR 8036: Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1983.

BARROS, J. M. de C. Rebaixamento do lençol freático exige cuidados e a melhor técnica. *AECweb*, 2018. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/revista/materias/rebaixamento-do-lencol-freatico-exige-cuidados-e-a-melhor-tecnica/16886>. Acesso em: 10 nov. 2020.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; ALBIERO, J. C. *Fundações diretas: projeto geotécnico*. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

DAS, B. M. *Princípios de engenharia de fundações*. 8. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2016.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Brasília: Embrapa, 2018. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094003?mode=full>. Acesso em: 2 nov. 2020.

FALCONI, F. *et al.* (ed.). *Fundações: teoria e prática*. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

GUIMARÃES, D.; PETER, E. A. *Fundações*. Porto Alegre: Sagah, 2018.

HACHICH, W. *et al.* (ed.). *Fundações: teoria e prática*. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998.

JANUÁRIO, G. Tipos de solo e suas aplicações na construção civil. *Geosensori*, 9 maio 2019. Disponível em: <https://www.geosensori.com.br/2019/05/09/tipos-de-solo-e-suas-aplicacoes-na-construcao-civil/>. Acesso em: 10 nov. 2020.

PINTO, C. de S. *Curso básico de mecânica dos solos*. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

TOPOGRAFIA.COM. *Controle de recalques – Torre 4 – 10º Pavimento*. São Paulo: Topografia.com, 2020a.

TOPOGRAFIA.COM. *Controle de recalques – Torre 4 – 20º Pavimento*. São Paulo: Topografia.com, 2020b.

VELLOSO, D. de A.; LOPES, F. de R. *Fundações*. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

Contato

Paulo Afonso de Cerqueira Luz
paulo.luz@mackenzie.br

Tramitação

Recebido em julho de 2021.
Aprovado em fevereiro de 2022.