

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/311

Estudo do Comportamento de Sapatas Estaqueadas Assentes em Solo Residual

Alexia Cindy Wagner

Doutoranda, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, alexia-wagner@hotmail.com

Larissa Fernandes Sasso

Mestra, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, larisasso08@hotmail.com

Luizmar da Silva Lopes Jr.

Responsável Técnico, Multisolos Estaqueamento e Sondagem Ltda, Passo Fundo-RS,

luizmarjunior@multisolos.com.br

Cesar Alberto Ruver

Professor, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, cesar@ufrgs.br

Nilo Cesar Consoli

Professor titular, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, consoli@ufrgs.br

RESUMO: O desafio da engenharia de fundações é oferecer soluções que atendam de forma econômica e segura a diferentes condições de carregamento em solos com comportamentos distintos. As fundações mistas surgem como uma opção que pode ser benéfica em relação aos projetos convencionais. Esse tipo de estrutura combina elementos de fundação superficial e profunda de forma a contribuir com o aumento de resistência e rigidez do sistema, dependendo do solo existente no local. Nesse contexto, o presente trabalho pretende avaliar o comportamento geotécnico de sapatas estaqueadas assentes em solo residual fracamente cimentado, visto que tais solos apresentam características peculiares em relação aos solos sedimentares. Para isso, foram executadas em campo fundações isoladas convencionais (sapata, estaca e grupos de estaca) e fundação mista (sapata estaqueada). Todos os elementos foram submetidos a provas de carga estática a fim de avaliar seus comportamentos carga-recalque. Os resultados demonstraram que a sapata estaqueada apresenta melhor desempenho geotécnico do que as fundações convencionais. A capacidade de carga da sapata estaqueada pode chegar a mais de 80% da soma das capacidades de carga dos elementos individuais (sapata + grupo de estacas). Apesar da redução de desempenho devido à interação entre os elementos, grande parte do desempenho individual é mantido, o que indica a viabilidade do uso do conceito de sapatas estaqueadas em solos residuais com características semelhantes ao estudado.

PALAVRAS-CHAVE: Sapata Estaqueada, Solo Residual, Prova de Carga, Recalques.

ABSTRACT: The foundation engineering challenge is to provide economical and safe solutions for different loading conditions in soils with different behavior. Combining foundations has become an option that can be beneficial in relation to traditional designs. This type of foundation combines shallow and deep components, aiming to increase the strength and stiffness of the system, which depends on the local soil. In this context, this study intends to evaluate the geotechnical behavior of piled footings built on weakly cemented residual soil, since these soils have peculiar characteristics compared to sedimentary soils. For this purpose, isolated foundations (footing, pile, and pile groups) and combined foundations (piled footings) were executed in the field. All the elements were subjected to static load tests to evaluate their load-settlement behavior. The results showed that piled footings presented a better geotechnical response than conventional foundations. The load capacity of the piled footing can reach more than 80% of the sum of the load capacities of the individual components (footing + pile group). Despite the reduction in performance due to the interaction between the components, a large part of the individual performance is maintained. This indicates the feasibility of using the piled footing concept in residual soils with characteristics similar to the one studied.

KEYWORDS: Piled Footing, Residual Soil, Load Test, Settlement.

1 INTRODUÇÃO

As fundações convencionais são divididas em superficiais ou profundas, sendo incomum a associação entre esses elementos na prática de engenharia. Por apresentarem custo menor, as fundações superficiais sempre são a primeira opção a ser considerada em projetos de fundação. No entanto, quando as propriedades do subsolo não atendem aos requisitos geotécnicos, opta-se pelo uso de fundações profundas, o que aumenta consideravelmente os custos da obra (Salgado, 2008).

Normalmente é necessário utilizar mais de uma estaca para suportar os carregamentos, as quais são unidas por um bloco de coroamento. O bloco é considerado um elemento estrutural que tem a função de transmitir os carregamentos provenientes da superestrutura para as estacas, as quais distribuem os esforços para o solo. Entretanto, o bloco de coroamento geralmente é construído em contato com a superfície do solo e tende a participar na distribuição dos esforços. Essa parcela é desconsiderada em projetos convencionais, embora sua contribuição na resistência possa ser significativa em algumas situações (Décourt et al., 1998).

O estudo de fundações mistas tem crescido muito nos últimos anos, especialmente voltado a edifícios altos (e.g. Novak et al., 2005; Nguyen et al., 2014; Sharafkhan e Shooshpasha, 2018). Nesse caso, essas fundações são do tipo radier estaqueado, em que a fundação superficial abrange praticamente toda a estrutura na forma de um radier. O radier recebe as cargas dos pilares e as redistribui para as estacas e também para o solo superficial. A viabilidade do uso de fundação mista depende da eficiência da fundação superficial, ou seja, das características do solo existente na superfície do terreno. Nesse sentido, os perfis mais indicados seriam areias densas ou argilas médias e rijas (Poulos, 2001).

Além da aplicabilidade em prédios altos, o uso de fundações mistas também pode oferecer benefícios a obras pequenas. O conceito de sapata estaqueada refere-se a uma sapata (dimensão menor que o radier) que recebe um único ponto de carregamento (como um pilar) e o distribui para as estacas e para o solo. Esse tipo de fundação pode ser uma solução intermediária quando fundações superficiais não atendem aos requisitos geotécnicos necessários e o uso de fundação totalmente estaqueada é inviável economicamente. Alguns casos da literatura demonstram que a consideração da contribuição da sapata resulta na redução de recalques e aumento da capacidade de carga do elemento (Sales, 2000; Castillo, 2013; Bittencourt, 2018). Entretanto, essa contribuição depende diretamente do tipo de solo.

Nesse contexto, surge a necessidade de avaliar a aplicabilidade desse tipo de fundação em solos diferentes de areias e argilas. Os solos residuais são criados pelo intemperismo químico das rochas. O intemperismo resulta na formação de compostos cimentícios entre as partículas de solo, resultando em características distintas de outros materiais (Wesley, 2010). Assim, o processo de formação torna o solo residual poroso, porém a leve cimentação natural confere uma alta resistência inicial, o que influencia diretamente a mobilização de resistência nas fundações assentes em tais solos durante os carregamentos.

O uso de fundações superficiais em solo residuais é restrito, visto que após a quebra da leve cimentação ocorrem deformações bruscas e recalques excessivos. Por isso, fundações profundas (estacas e grupos de estacas) geralmente são adotadas nesses solos. Nesse sentido, as sapatas estaqueadas surgem como uma opção intermediária, que poderia reduzir os custos de fundações em obras realizadas nesse tipo de solo. Portanto, o presente trabalho investiga o comportamento de diferentes fundações em solo residual: estaca isolada, sapata, grupo de estacas e sapata estaqueada. O objetivo é avaliar a viabilidade de considerar o conceito de fundações mistas em um solo peculiar, contribuindo com a prática de engenharia.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Campo experimental

A pesquisa foi realizada em um campo experimental localizado na cidade de Passo Fundo, no Rio Grande do Sul. O solo do local é do tipo residual homogêneo, originário de rochas basálticas (ígneas) e de arenitos (sedimentar). O solo é predominantemente composto por argila (60%), com parcelas de silte (5%) e areia (35%), apresentando um índice de plasticidade (IP) de 11%. A Figura 1 apresenta o perfil obtido através de ensaios CPT realizados no campo experimental. A resistência por atrito (f_s) variou em torno de 100 kPa, enquanto a resistência de ponta (f_c) foi de cerca de 2 MPa. O índice de classificação do material (I_c) ficou em

torno de 3, o que indica um solo argiloso. O nível d'água foi identificado somente na profundidade de 10 m. Observa-se que o solo apresenta um perfil relativamente homogêneo até os 5 metros (a resistência de ponta e atrito lateral apresentarem pouca variação). Uma leve tendência de aumento na resistência com a profundidade é observada, típico de solos residuais ao se aproximar da rocha mãe. A maior resistência observada na superfície do terreno está relacionada a compactação pelo tráfego de veículos no terreno. Por isso, a camada superficial do solo foi removida antes da execução das fundações superficiais. Ensaios SPT realizados no terreno indicam um N_{SPT} médio de 5 (com lavagem) e 11 (sem lavagem) para os três primeiros metros em que foram executadas as fundações. Além disso, o solo até essa profundidade foi classificado como argila de coloração marrom-avermelhada de consistência média a rijá através de amostras coletadas no ensaio SPT.

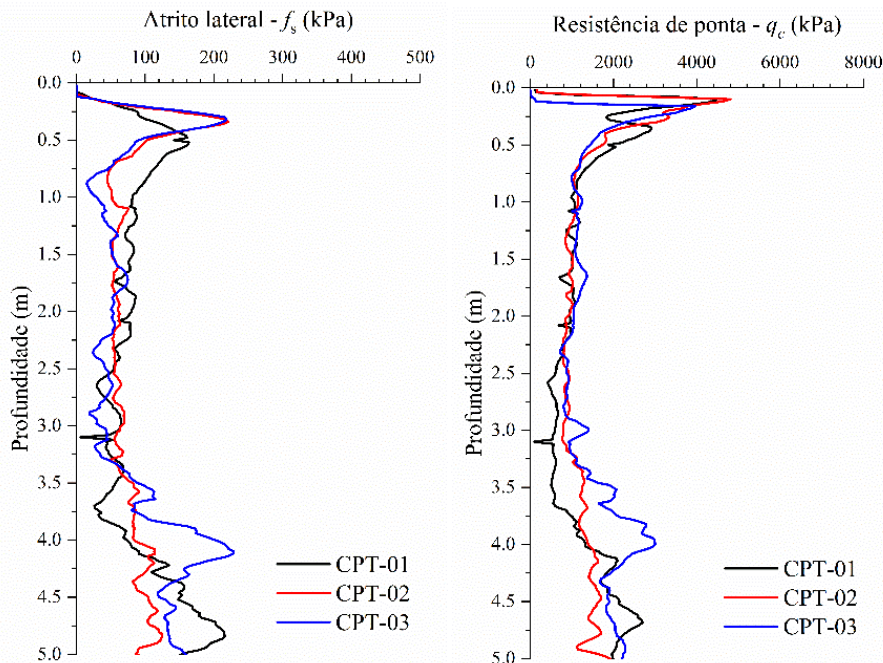


Figura 1. Perfil do campo experimental.

2.2 Definição das fundações

A Figura 2 apresenta os quatro tipos de fundações estudados na pesquisa e a Tabela 1 apresenta as características dessas. Foram estudados os elementos individuais (sapata e estaca), grupo de estacas (para considerações sobre efeito de grupo) e sapata estaqueada. As pequenas dimensões visam investigar a aplicabilidade de fundações mistas para obras de pequeno porte. A sapata estudada apresenta formato quadrado (80cm) e foi dimensionada para apresentar comportamento rígido (altura de 35cm). A estaca selecionada foi de pequeno diâmetro (10cm) e profundidade (3m), sendo que o espaçamento adotado no grupo de estacas foi de três vezes o diâmetro entre eixos (30cm), com quatro estacas por grupo. Todas as fundações foram construídas em concreto armado no campo experimental. No caso do grupo de estacas, o contato do bloco com o terreno foi evitado através do uso de uma placa de poliestireno (a qual foi removida antes da prova de carga) a fim de avaliar somente o desempenho do grupo. Já a sapata estaqueada foi construída com a sapata apoiada diretamente sobre o terreno e sobre o grupo de estacas. As sapatas estaqueadas da presente pesquisa podem ser classificadas como “pequenos radiers estaqueados” conforme a definição de Russo e Viggiani (1998), pois apresentam relação $B/L < 1$ (B é a largura da sapata e L o comprimento da estaca).

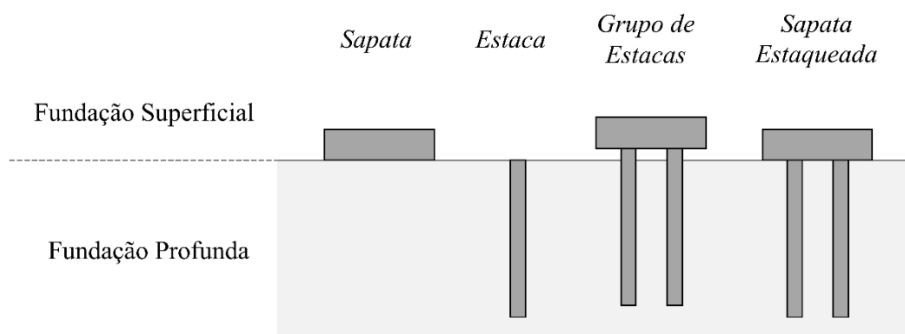


Figura 2. Tipos de fundações estudadas

Tabela 1. Características das fundações estudadas.

Fundação	Dimensão Sapata/Bloco	Estacas	Dimensão Estacas	Espaçamento	Contato Sapata/Bloco com Solo
Sapata	80x80x35 (cm)	-	-	-	-
Estaca	-	1	10x300 (cm)	-	-
Grupo de Estacas	80x80x35 (cm)	4	10x300 (cm)	30cm	Não
Sapata Estaqueada	80x80x35 (cm)	4	10x300 (cm)	30cm	Sim

2.3 Provas de carga

As provas de carga foram realizadas seguindo as orientações da NBR 6489: Solo - Prova de carga estática em fundação direta (ABNT, 2019) e da NBR 16903: Solo - Prova de carga estática em fundação profunda (ABNT, 2020) seguindo o método de carregamento lento. O método de ensaio consiste na aplicação de esforços estáticos axiais de compressão, com o registro dos deslocamentos correspondentes. A Figura 3 apresenta o esquema adotado para realização das provas de carga. O sistema de reação utilizado foi um pórtico com aproximadamente 23 toneladas e a transmissão de cargas para a fundação foi realizada através de um macaco hidráulico e bomba manual. Um sistema de aquisição foi utilizado para registros de carga (através de célula de carga) e deslocamentos (cinco transdutores de deslocamento posicionados sobre o elemento) durante a execução dos ensaios.



Figura 3. Configuração da prova de carga.

3 RESULTADOS

3.1 Efeito de grupo

A Figura 4 apresenta as curvas carga-recalque da estaca e do grupo de estacas ensaiados. Nota-se dois trechos bem definidos para as curvas dos dois elementos: rigidez elevada seguida de um aumento contínuo dos recalques. O comportamento está relacionado ao mecanismo de transferência de carga em estacas escavadas, em que o atrito lateral é mobilizado em pequenos deslocamentos e a ponta só é mobilizada em níveis de deslocamento maiores. Nesse caso, a parcela de atrito lateral foi responsável por resistir aos primeiros incrementos (rigidez inicial), enquanto o recalque acentuado ocorreu devido ao esgotamento dessa parcela e ausência de uma resistência de ponta significativa (solo fofo no fundo do fuste escavado e pequeno diâmetro da estaca). A verticalização das curvas no trecho final indica uma ruptura nítida. Dessa forma, a carga de ruptura da estaca individual é de 35kN e a do grupo de estacas foi de 118kN.

Como o grupo de estacas é composto por quatro estacas, foi plotado na Figura 4 a curva carga-recalque esperada caso não houvesse nenhum efeito de grupo (4 vezes a estaca individual), resultando em uma carga de ruptura de 140kN. Verifica-se que a eficiência do grupo de estacas foi de 84%, indicando que a associação das estacas em grupo reduziu em 16% a capacidade de carga da fundação. Essa redução possivelmente está associada ao desconfinamento gerado no terreno durante a escavação das estacas e também da própria influência entre as estacas durante os carregamentos, visto que as mesmas estavam apenas há 30cm de distância. Mesmo assim, constata-se que a eficiência do grupo foi alta para as condições avaliadas.

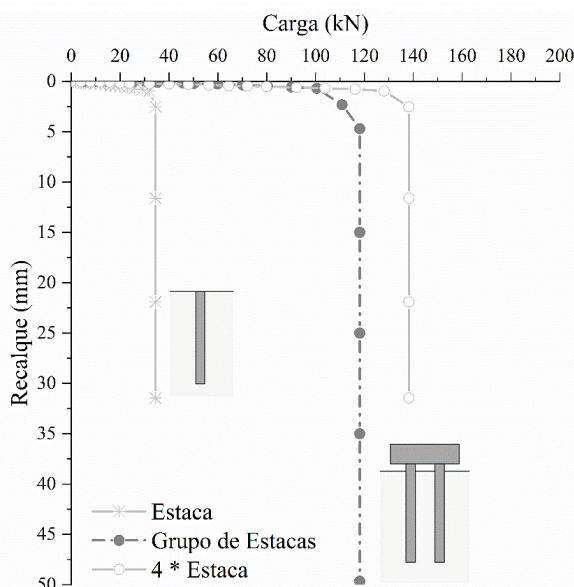


Figura 4. Análise do efeito de grupo.

3.2 Contribuição da sapata

A Figura 5 apresenta as curvas carga-recalque do grupo de estacas (sem contato do bloco com o terreno) e da sapata estaqueada (com contato do bloco com o terreno). Verifica-se que a contribuição do elemento superficial resulta na redução de recalques e no aumento da capacidade de carga do grupo de estaca convencional. A contribuição da sapata ocorre pois o solo residual apresenta elevada rigidez inicial (oriunda da leve cimentação), o que faz com que a fundação superficial desenvolva resistência significativa antes da mobilização total das estacas. Como a ruptura não foi nítida para a sapata estaqueada, adotou-se um recalque limite de 20mm para avaliação da carga de ruptura, resultando em um valor de 205kN. Dessa forma, o contato da sapata aumenta em 87kN a carga de ruptura do bloco de estacas (um acréscimo de 70% na carga de ruptura do elemento). Assim, ao considerar o contato da fundação superficial (ou do próprio bloco existente em grupos

de estacas convencionais) seria possível considerar cargas de projeto superiores. Para um fator de segurança (FS) igual a 2, a carga de projeto adotada para a sapata estaqueada seria de 102kN, enquanto para o grupo de estacas seria de 59kN, o que possibilitaria economia significativa ao projeto de fundação ao considerar a contribuição da sapata.

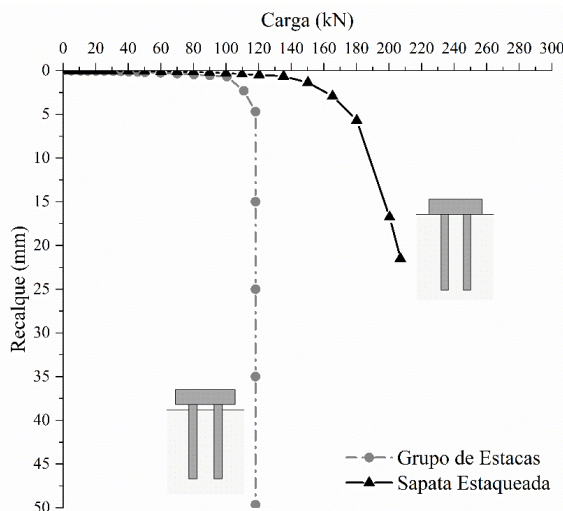


Figura 5. Análise da contribuição da sapata.

3.3 Contribuição das estacas

A Figura 6 apresenta a curva carga-recalque obtida para a sapata individual. O solo apresentou poucos deslocamentos até aproximadamente 70 kN, sendo que a partir desse valor acentuaram-se os recalques durante os estágios seguintes. Esse comportamento é típico de solos residuais, visto que a leve cimentação entre os grãos proporciona uma elevada rigidez inicial até alcançar um determinado nível de carregamento que cause sua desestruturação e conseqüente aumento de deslocamentos (devido ao alto índice de vazios inicial). Nota-se que as estacas adicionadas sob a sapata atuaram como redutoras de recalque, além de aumentarem a capacidade de carga da fundação superficial. Considerando um recalque limite de 20mm, a carga de ruptura da sapata aumentou de 115kN para 205kN com a inclusão do grupo de estacas (sapata estaqueada). Supondo um $FS = 2$, a carga de projeto adotada para a sapata estaqueada seria 1,78 vezes maior que a carga de projeto adotada para a sapata individual. Dessa forma, o conceito de utilizar estacas para trabalhar em conjunto com a sapata existente reduz a necessidade de mudar o sistema de fundação para totalmente estaqueado.

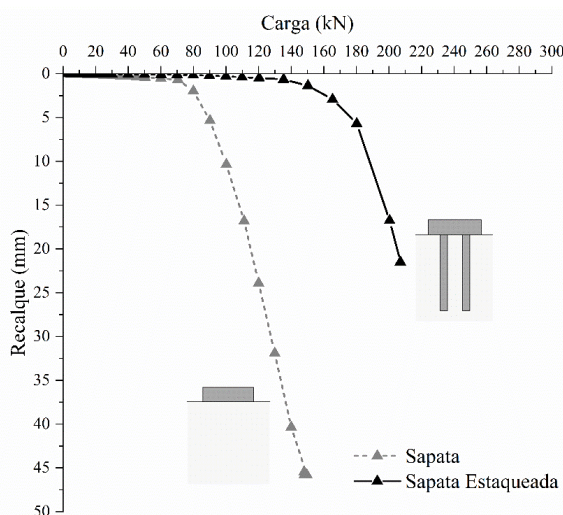


Figura 6. Análise da contribuição do grupo de estacas.

3.4 Eficiência da sapata estaqueada

O desempenho da sapata estaqueada está relacionado ao comportamento dos elementos isolados (grupo de estaca e sapata), os quais ao serem combinados geram uma resposta carga-recalque que é influenciada pelas diferentes interações entre os elementos. A Figura 7 compara a curva obtida para a sapata estaqueada com a curva teórica obtida pela soma das cargas suportadas pelo grupo de estacas e pela sapata individualmente. Nota-se que a curva teórica é superior a obtida em campo, ou seja, há uma redução na eficiência dos elementos devido as interações solo-estrutura e estrutura-estrutura. Comparando a carga de ruptura teórica para um recalque limite de 20mm (233kN) com a carga de ruptura obtida para a sapata estaqueada (205kN) encontra-se uma eficiência de 88% para a combinação dos elementos. Ou seja, a capacidade de carga da sapata estaqueada foi 88% da soma das capacidades de carga dos elementos isolados (grupos de estacas + sapata). O valor encontrado está na faixa apresentada por De Sanctis e Mandolini (2006), os quais indicam que tal fator se situa no intervalo de 0,80 a 1, ou seja, que a capacidade de um radier estaqueado é de pelo menos 80% da soma das capacidades dos componentes separados.

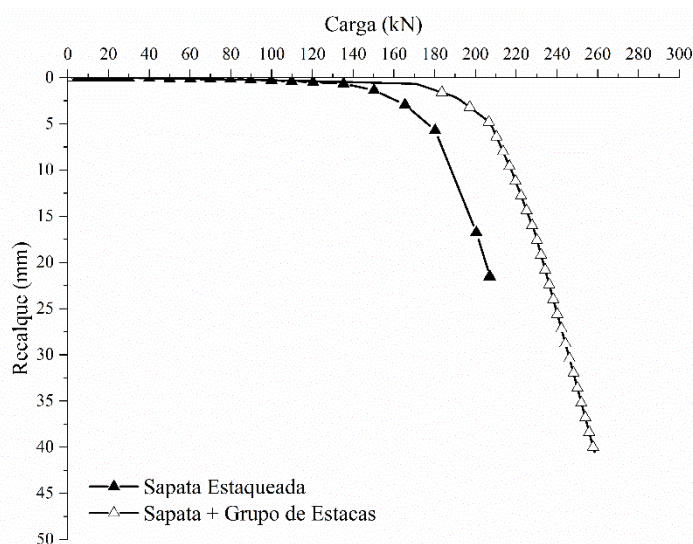


Figura 7. Eficiência da sapata estaqueada.

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho avaliou o comportamento de diferentes tipos de fundações assentes em solo residual. As fundações foram executadas em um campo experimental e submetidas a provas de carga. O objetivo principal foi investigar a viabilidade de fundações mistas para edificações de pequeno porte em solos com leve cimentação natural. A partir dos resultados apresentados, e considerando as limitações do programa experimental, as seguintes conclusões podem ser feitas:

A eficiência do grupo de estacas foi de 0,84 indicando que a associação das estacas em grupo reduziu a capacidade de carga em relação à estaca individual.

A sapata estaqueada apresentou melhor desempenho geotécnico do que as fundações convencionais em termos de capacidade de carga e recalques. Para um mesmo fator de segurança é possível adotar cargas de projeto superiores ao considerar a contribuição do bloco de coroamento em grupos de estacas ou a adição de estacas sob a sapata.

A capacidade de carga obtida para a sapata estaqueada pode chegar a mais de 80% da soma das capacidades de carga dos elementos individuais (sapata + grupo de estacas). Apesar da redução de desempenho devido à interação entre os elementos, grande parte do desempenho individual é mantida, o que indica a viabilidade do uso de sapatas estaqueadas em solos residuais com características semelhantes ao estudado.

Como na prática de fundações o bloco de coroamento dos grupos de estacas é normalmente executado em contato com o terreno, os resultados demonstram que a consideração dessa contribuição nos projetos de fundações pode reduzir o significativamente o custo da obra.

Finalmente, o trabalho demonstra que as sapatas estaqueadas representam uma alternativa adequada para habitações de pequeno porte em solos residuais.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos a Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2020). *NBR 16903: Solo - Prova de carga estática em fundação profunda*. Rio de Janeiro: 11 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2019). *NBR 6489: Solo - Prova de carga estática em fundação direta*. Rio de Janeiro: 11 p.
- Bittencourt, E. C. (2018). *Comportamento de Radiers Estaqueados Assentes em Solos Arenosos*. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2018.
- Castillo, D.Y.A. (2013). *Uso da Técnica de Radier Estaqueado para Pequenos Edifícios assentes sobre Solo Colapsível*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília.
- Décourt, L.; Albiero, J. H.; Cintra, J. C. A. (1998). *Análise e projeto de fundações profundas*. In: HACHICH, W. et al. (Eds.). *Fundações: teoria e prática*. 2. ed. São Paulo: PINI, p. 265-27.
- De Sanctis, L.; Mandolini, A. (2006). *Bearing Capacity of Piled Rafts on Soft Clay Soils*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 132, n. 12, p. 1600–1610.
- Nguyen, D.D.C., Kim, D. e JO, S. (2014). *Parametric study for optimal design of large piled raft foundations on sand*. *Computers and Geotechnics*, 55, 14-26.
- Novak, J. L.; Reese, L.C.; Wang, S. T. (2005). *Analysis of Pile-Raft Foundations with 3D Finite Element Method*. *Proceedings of the Structures Congress 2005*.
- Poulos, H. G. (2001). *Piled raft foundations: design and applications*. *Géotechnique*, v. 51, n. 2, p. 95–113.
- Russo, G.; Viggiani, C. (1998). *Factors controlling soil-structure interaction for piled rafts*. *Proc. Int. Conf. on Soil-Structure Interaction in Urban Civil Engineering*. Darmstadt, 297-322.
- Sales, M. (2000). *Análise do comportamento de sapatas estaqueadas*. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília.
- Salgado, R. (2008). *The Engineering of Foundations*. Boston: McGraw Hill.
- Sharafkhah, M. e Shooshpasha, I. (2018). *Physical modeling of behaviors of cast-in-place concrete piled raft compared to free-standing pile group in sand*. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10 (4), 703-716.
- Wesley, L. D. (2010). *Fundamentals of Soil Mechanics for Sedimentary and Residual Soils*. Hoboken: John Wiley & Sons.