

Comparação Entre Projetos de Fundação em Sapata Subsidiados por Diferentes Métodos de Determinação da Tensão Admissível

Yan Oliveira Cabral ^(a), Randal Silva Gomes ^(a), Rennebrí Leandro da Silva ^(a)

^(a) Graduados em Engenharia Civil pelo Centro Universitário Luterano de Palmas

Resumo A gama de métodos de cálculo da capacidade de carga do solo torna procedente a condução de pesquisas que visem confrontá-los para definir a sua viabilidade. Nesse sentido, este trabalho buscou avaliar comparativamente os métodos propostos por Terzaghi e as metodologias semi-empíricas baseadas no índice de resistência à penetração do solo, com vistas ao impacto econômico que estas formulações possuem no dimensionamento dos elementos de fundação. Com base nos laudos de dois tipos de solo com características geotécnicas diferentes e na planta de cargas procedeu-se a elaboração do projeto de fundações tendo em vista os parâmetros de cálculo da tensão admissível. Ao final foram obtidas quatro propostas de projeto comparadas entre si no que tange ao quantitativo de materiais. Os resultados demonstraram que as metodologias utilizadas apresentam diferenças principalmente devido a variação das características geotécnicas. Para um solo com índices de coesão e ângulo de atrito próximos deve-se empregar os arquétipos de Terzaghi. Por outro lado, quando há disparidade na relação das características geotécnicas, os modelos semi-empíricos são mais econômicos devido adequação dos métodos com a forma de ruptura do solo.

Palavras-chave: capacidade de carga do solo, características geotécnicas, Terzaghi, resistência à penetração.

Abstract The range of methods of calculating soil loading capacity makes it possible to conduct research aimed at confronting them to determine their viability. In this sense, this work sought to evaluate comparatively the methods proposed by Terzaghi and the semi-empirical methodologies based on the resistance index to the soil penetration, considering the economic impact that these formulations have on the dimensioning of the foundation elements. Based on the reports of two types of soil with different geotechnical characteristics and in the loading plan, the foundations project was elaborated considering the parameters of the allowable voltage calculation. At the end, it obtained were four proposals compared amongst themselves with respect to the quantitative of materials. The results showed that the methodologies used differ mainly due to the variation of geotechnical characteristics. For a soil with close cohesion indexes and angle of friction, the Terzaghi archetypes must be employed. On the other hand, when there is a disparity in the geotechnical characteristics, the semi-empirical models are more economical due to the adequacy of the methods with the form of soil rupture.

Key words: soil load capacity, geotechnical characteristics, Terzaghi, resistance to penetration.

1 Introdução

O estudo dos maciços terrosos para a sustentação de obras de engenharia evoluiu continuamente desde o que propôs Coulomb em 1776 acerca da resistência ao cisalhamento do solo trabalhando-se em termos de tensões totais, até as formulações desenvolvidas por Terzaghi (1943), Meyerhof (1965) e Vesic (1975) e muitos outros tratando o solo em termos de tensões efetivas e considerando além de parâmetros geotécnicos, a influência da geometria do elemento de fundação e as cargas atuantes e resistentes no processo.

As proposições desses autores demandam ensaios dispendiosos para caracterizar o solo de forma contundente. Por isso, pesquisadores como Terzaghi & Peck (1948) e Leme (1953) além de Skempton (1956) e Vargas (1977) buscaram adotar métodos mais simplificados para a determinação da tensão admissível correlacionando, através

de projeções estatísticas, o índice de resistência à penetração do solo com ensaios de prova de carga sobre placa.

A difusão dessas metodologias fez com que os profissionais da área recorressem menos as análises laboratoriais para o levantamento das características geotécnicas do solo no que tange as obras de edificações principalmente. De tal situação é que surgiu o questionamento acerca da viabilidade econômica da substituição de investigações geotécnicas mais consistentes por tais correlações para a determinação da capacidade de carga do solo como subsídio ao dimensionamento de elementos de fundação direta.

Pesquisas de Celestino *et al.* (2014) identificam que o modelo de Terzaghi resulta em maiores tensões admissíveis para o solo em relação a métodos empíricos e Schnaid (2000) propõe que os coeficientes de segurança globais sejam minorados em função da precisão dos levantamentos geotécnicos. Por isso, supõe-se que o projeto de fundações

resultará em elementos de menor dimensão haja vista que a geometria das sapatas é reduzida quando há o aumento da capacidade de carga do solo.

Para atestar tal raciocínio é que se tornou procedente a asserção deste trabalho, objetivando avaliar qual metodologia de determinação da capacidade de carga do solo resulta em um projeto de fundação do tipo sapata mais econômico.

A pesquisa consistiu em elaborar um projeto de fundações para dois tipos de solo a partir da obtenção da tensão admissível por metodologias diferentes (o modelo proposto por Terzaghi e melhorado por Vesic; e os arquétipos que consideram o índice médio de resistência à penetração do solo - N_{spt}). Os métodos de determinação da capacidade de carga foram comparados a fim de determinar qual deles resulta em um projeto de fundação mais econômico no que tange a quantidade de concreto e aço necessários à execução das sapatas. As características geotécnicas foram um fator preponderante nessa análise.

2 Materiais e Métodos

Esta seção apresenta a metodologia utilizada no desenvolvimento do presente trabalho, descrevendo os procedimentos necessários para obtenção dos resultados que consistiram na pauta das ações impostas à elaboração de projetos de fundações em sapata subsidiados por métodos diferentes de determinação da capacidade de carga do solo (modelo de Terzaghi e método do N_{spt} médio para o bulbo de tensões).

O trabalho foi fundamentado na realização do dimensionamento geotécnico (segundo os métodos de determinação de carga do solo apresentados), geométrico e estrutural, levantamento de quantitativos, análise comparativa e elaboração dos projetos de fundação para dois tipos de solo. A Figura 1 resume todo o procedimento realizado para a conclusão deste trabalho.

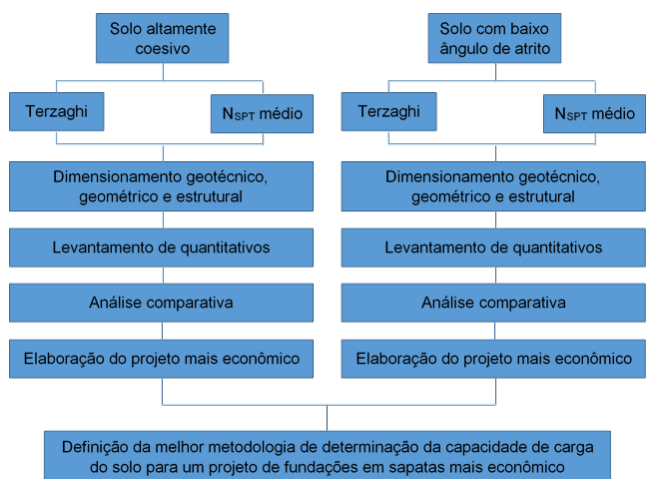


Figura 1 Metodologia de trabalho.

Como observa-se na Figura 1 a pesquisa foi pautada na análise de dois tipos de solo: solo coesivo (solo 01) e solo com baixo ângulo de atrito (solo 02), a fim de avaliar a influência dos métodos citados sobre o projeto de fundações. Esta premissa foi um fator importante nas considerações sobre os resultados alcançados, pois ao analisar solos de comportamentos aparentemente diferentes

foi possível aferir as condicionantes que influenciaram nas avaliações realizadas a partir das duas formas de determinação da capacidade de carga do solo adotadas neste trabalho.

Na fase de análise geotécnica foi determinada a capacidade de carga dos solos em voga com base no método de Terzaghi e o método do N_{spt}; Em seguida, procedeu-se com o cálculo da geometria dos elementos de fundação pelo levantamento de hipóteses acerca das dimensões da sapata de modo que o solo fosse capaz de suportar as cargas transferidas por este elemento, garantindo as condições de recalque; No dimensionamento estrutural determinou-se a quantidade de aço necessário; e por fim foram elaborados os projetos e a análise comparativa no que tange ao quantitativo de materiais.

3 Resultados e Discussão

Esta seção apresenta e discute os resultados oriundos do dimensionamento geotécnico, geométrico e estrutural com base na planta de cargas e nas características do solo. Foram analisados dois tipos de solo que se diferenciam pelas características geotécnicas: o solo 01 apresenta alta coesão e o solo 02 possui baixo ângulo de atrito interno.

3.1 Dimensionamento Geotécnico

Os resultados da análise oriunda do dimensionamento geotécnico dos solos para obtenção da capacidade de carga através do método teórico de Terzaghi e os semi-empíricos de Alonso, Vargas, Velloso e Lopes estão apresentados na Figura 2.

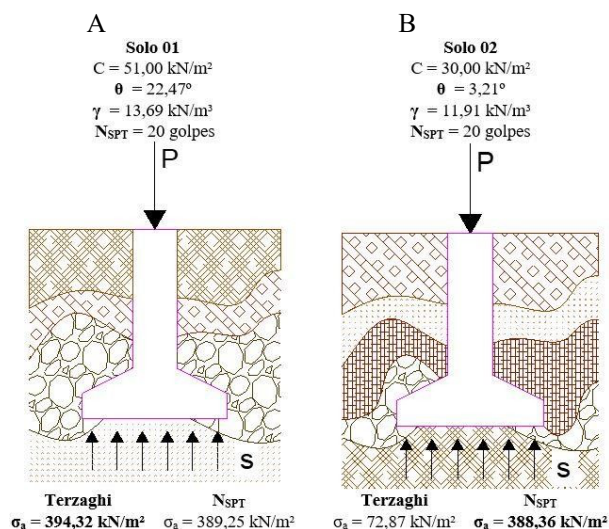


Figura 2 Resultados da análise geotécnica.

Na Figura 1A as metodologias de cálculo apresentam resultados diferentes para a tensão admissível do solo, mas com variação pequena, apenas 1,07%. Um ponto importante a ressaltar é que os procedimentos semi-empíricos dos três autores apresentados limitam o índice de resistência a penetração do solo a no máximo 20 golpes, assim mesmo que os valores médios de N_{spt} no bulbo de tensões sejam superiores não poderá ser utilizado um índice maior que 20 para o dimensionamento da fundação.

As capacidades de carga obtidas nas duas metodologias de cálculo resultam em valores com uma variação exorbitante, como mostra a Figura 1B. Enquanto que o método que considera o N_{SPT} médio para o bulbo de tensões apresenta uma tensão admissível de 388,36 kN/m² a proposta de Terzaghi redonda este valor em 72,87 kN/m² como valor médio, o que equivale a uma redução de 81,31% na resistência do solo às solicitações impostas pela fundação.

Este fato está associado ao desequilíbrio das características geotécnicas que denotam um ângulo de atrito interno entre as partículas de solo muito baixo, reduzindo significativamente a parcela de contribuição do mecanismo resistente de atrito na equação de Terzaghi (a zona radial de cisalhamento permanece próxima de 45°).

Outro ponto importante a ser destacado nesta análise é o elevado índice de resistência à penetração do solo apresentado no método 01, contraditório aos valores

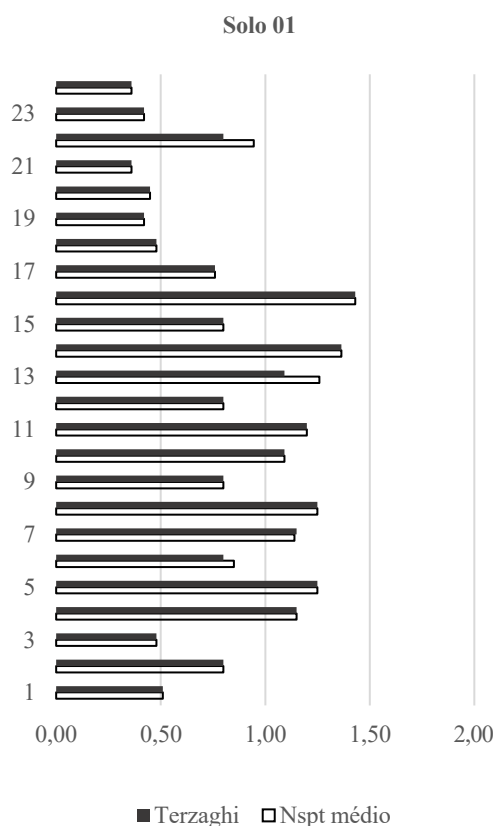
apresentados. A justificativa para os fatos elencados vem da pesquisa de Santos (2015), que remete a incompatibilidade do método de Terzaghi com as análises feitas para a determinação das características do solo, uma vez que o mesmo não rompe por cisalhamento, neste caso.

Outro ponto a ressaltar é que as características geotécnicas acabam não se tornando representativas para todo o perfil de solo do terreno uma vez que foi analisada a uma profundidade limitada, inferior a cota de assentamento dos elementos de fundação que serão executados.

3.2 Dimensionamento Geométrico

A Figura 3, mostra um comparativo entre as áreas de cada sapata calculadas a partir dos valores de tensão admissível do solo apresentados anteriormente. Dessa forma é possível analisar a influência dos métodos de determinação da capacidade de carga do solo nas dimensões das sapatas

A.



B.

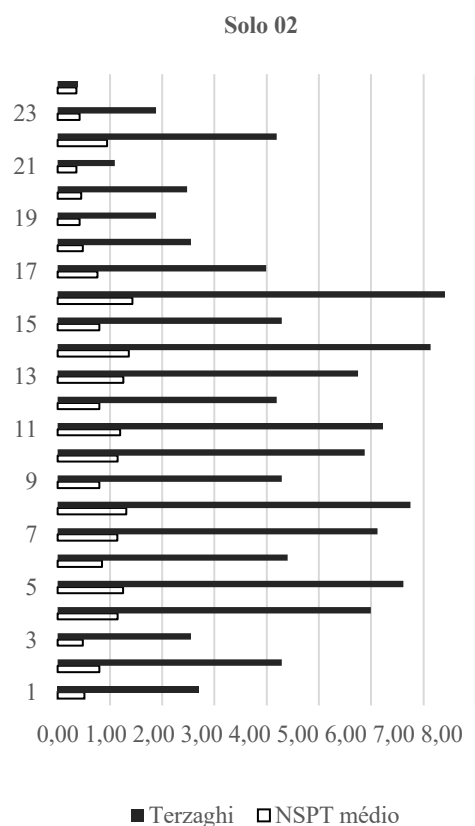


Figura 3 Comparação entre a área das sapatas.

Para o solo 01, como mostra a Figura 3A, observa-se divergência nas sapatas S6, S7, S13 e S22 que apresentaram variação de 0,05 m², 0,01 m², 0,17 m² e 0,15 m², respectivamente, associada às tensões admissíveis do solo.

Já na Figura 3B, houve variação nas dimensões proporcional às mudanças na capacidade de carga do solo na comparação entre os métodos (em S16, por exemplo, houve uma disparidade gritante de 5,98 m²).

A geometria dos elementos de fundação está diretamente associada ao comportamento do solo quando

solicitado por um carregamento qualquer, por isso as

dimensões das sapatas variam proporcionalmente às mudanças na capacidade de carga do solo, como afirma a análise gráfica apresentada na Figura 3.

3.3 Dimensionamento Estrutural

Cálculo estrutural tenderam ao mesmo comportamento já descrito outrora.

Para o primeiro solo analisado os resultados divergentes ocorreram em S6, S7, S13 e S22, fator atribuído as dimensões das sapatas que se apresentaram discrepantes frente as metodologias de cálculo utilizadas na

determinação da capacidade de carga do solo. Ainda assim, a divergência entre os resultados apresentados foi insuficiente para interferir na quantidade de aço necessária, no diâmetro adotado e no espaçamento da armadura (com exceção de S22 que apresentou espaçamento de 8 cm para o método 01 e 9 cm para o método 02).

No caso do solo com baixo ângulo de atrito, 62,50% das sapatas resultaram em áreas de aço iguais para os dois métodos, contrariando o comportamento até então apresentado. Este fato se atrela a ocorrência de momentos

fletores pequenos, fazendo com que a área de aço calculada seja menor que a quantidade mínima necessária, que por sua vez depende exclusivamente das dimensões dos pilares.

As diferenças observadas se concentraram em S4, S5, S7, S8, S10, S11, S13, S14 e S16 que são as sapatas que apresentam maior altura, necessitando de uma seção de aço superior a mínima estabelecida.

Ainda sobre o dimensionamento estrutural é importante destacar a variação da altura das sapatas mostrada na Figura 4.

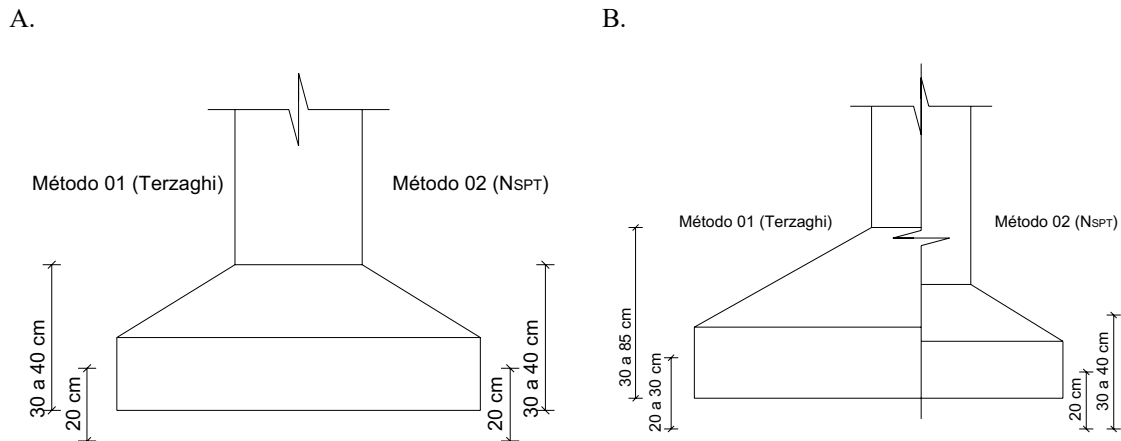


Figura 4 Variação na altura das sapatas.

No solo coesivo (Figura 4A), não houve oscilação na altura dos elementos ao passo que no solo 02 ocorreu disparidade decorrente da mudança das dimensões em planta dos elementos de fundação, quando confrontados os dois métodos de dimensionamento.

3.4 Levantamento de Quantitativos

O levantamento de quantitativos pautou a determinação do volume de concreto estrutural e aço resultantes dos dimensionamentos realizados. A Tabela 1 apresenta resumidamente estes valores.

Tabela 1. Quantitativo de aço e concreto

Quantitativos	Solo 01		Solo 02	
	Terzaghi	N _{SPT}	Terzaghi	N _{SPT}
Aço (kg)	129,6	130,6	454,9	128,1
Concreto (m³)	5,66	5,77	42,65	5,80

Consoante a Tabela 1 no solo 01 o dimensionamento por Terzaghi resultou em uma economia de 0,11 m³ no volume de concreto. Já no solo 02 ocorreu a redução de 86,40% no

volume total de concreto do método 01 para o método 02, diretamente relacionada a dimensões em planta e altura das sapatas.

No tocante ao consumo de aço, na primeira alternativa de solo vê-se que o método 02 exige 1,03 kg a mais de aço. Este acréscimo não representa sequer meia barra de aço (6 m). No segundo caso a diferença é visível e equivale a

4 Conclusão

A análise dos resultados possibilitou concluir que a escolha do método de determinação da capacidade de carga do solo deve ser atribuída ao comportamento do maciço e do tipo de edificação. Os modelos semi-empíricos consideram o rompimento do solo por puncionamento e as proposições de Terzaghi trabalham a ruptura por cisalhamento. É premente confrontar tais metodologias nas particularidades de cada situação.

Portanto, na elaboração de um projeto de fundações rasas em sapatas, o método que considera o índice médio de resistência à penetração do solo é mais viável para solos com maior gradiente geotécnico. Em situações contrárias é necessário avaliar os custos com procedimentos laboratoriais e os objetivos pretendidos para se optar pela sistemática de Terzaghi.

Referências

- ALONSO, U. R. **Exercícios de fundações**. São Paulo: Edgard Blücher, 1983. 202 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- _____. **NBR 6489**: Prova de carga direta sobre terreno de aproximadamente 44 barras de aço de 6,3 mm de diâmetro por seis metros de comprimento.

fundação: Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

_____. **NBR 6497**: Levantamento geotécnico: Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1983.

BAR, B. V. ; STEINNER, H. H. ; CARDOSO, L. M. ; KIRSCHNER, F. F. ; WAYHS, C. A. S. P. ; Ruver, C.A. .
Estudo da capacidade de carga e recalque dos solos residuais do noroeste do Rio grande do Sul. In: XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia

Geotécnica, 2016, Belo Horizonte. Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2016.

BUENO, B. de S.; LIMA, D. C.; RÖHM, S. A. **Capacidade de carga de fundações rasas**. Minas Gerais: Universidade Federal de Viçosa, 1985. 74 p.

CELESTINO, R. P.; JUNIOR M., C. B; LINS, P. G. C. **Estimativa probabilística das capacidades de carga de uma fundação rasa em alguns solos de Salvador**. In: XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Goiânia: 2003.

DAS, B. M. **Fundamentos da engenharia geotécnica**. Tradução da 7ª ed. americana. São Paulo: Thomson Editora, 2011. 610p.

HACHICH, W. (Org.); FALCONI, Frederico Fernando (Org.); SAES, J. L. (Org.); FROTA, R. Q. (Org.); CARVALHO, C. S. (Org.); NIYAMA, S. (Org.). **Fundações: Teoria e Prática**. 2. ed. São Paulo: Editora Pini Ltda., 1998. v. 1. 751 p. Inclui índice. ISBN 85-7266-098-4.

SCHNAID, F. **Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia de fundações**. São Paulo: Oficina de textos, 2000. p. 1-26.

SKEMPTON, A.W. AND MACDONALD, D.H. **The allowable settlement of buildings**. Proc. Inst. of Civ. Engrs., Part III, 5, 727-784, 1956.

MEYERHOF, G.G. **Shallow foundations**. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 91. No. SM2, 1965. P. 21-31.

TERZAGHI, K.; PECK, R.B. **Soil Mechanics in Engineering Practice**. John Wiley and Sons, New York, 566 p., 1948.

TERZAGHI, K. **Theoretical Soil Mechanics**. 1 ed. New York, John Wiley and Sons, 1943.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo: Editora McGraw-Hill do Brasil, 1977. 509p.

VELLOSO, D. de A.; LOPES, F. de R. **Fundações: Critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais**. 3ª ed. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2002. v. 1. 290 p. Inclui índice. ISBN 85-285-0052-7.