

## Influência da Utilização de Solo-Cimento na Capacidade de Carga de Fundações Superficiais

Giullia Carolina de Melo Mendes

Mestranda em Geotecnia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, giucmendes@gmail.com

Marcos Fábio Porto de Aguiar

Professor associado, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, Brasil, marcosporto@ifce.edu.br

Vamylle Brito Sousa

Graduanda em Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, Brasil, vamylle.brito@hotmail.com

Mirna Fabrício Oliveira

Graduanda em Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, Brasil, mirnafaboliveira@gmail.com

Ícaro José Fernandes Santos Bastos

Doutorando em Recursos Hídricos, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, icarofernandesbastos@gmail.com

**RESUMO:** Na engenharia geotécnica, a correta determinação da capacidade de carga de fundações e consequentemente seu dimensionamento, constituem-se como uma etapa essencial para a elaboração de um projeto assertivo e seguro. Para tanto, no caso de fundações superficiais, pode ser necessário realizar o melhoramento do solo em que esta será assente para viabilizar o projeto tecnicamente. Nesse sentido, este trabalho tem por objetivo apresentar a variação da capacidade de carga de uma sapata quadrada de 2,00m de lado, assente em diferentes proporções de solo-cimento, pelos métodos de Terzaghi (1943), Meyerhof (1955), Hansen (1970) e Vesic (1975), que são amplamente consolidados na literatura. Para tal, realizou-se ensaios de compressão triaxial estático em amostras compostas por areia melhorada com teores de cimento de 2%, 5% e 10%, no qual determinou-se seus respectivos ângulos de atrito e coesão. Concluiu-se que mesmo para baixos teores de cimento, o ganho de capacidade de carga é considerável, podendo viabilizar a execução desse tipo de fundação em locais onde a resistência do solo é baixa, ou, diminuir as dimensões da sapata, dependendo do caso. Recomenda-se realizar estudos através de modelos reduzidos para verificação do comportamento dessas fundações.

**PALAVRAS-CHAVE:** Capacidade de carga. Fundações superficiais. Solo-cimento. Melhoramento de solos. Ensaio triaxial.

**ABSTRACT:** In geotechnical engineering, the correct determination of the bearing capacity of foundations and consequently their dimensioning, constitute an essential step for the elaboration of an assertive and safe project. Therefore, in the case of shallow foundations, it may be necessary to realize the improvement of the soil on which it will be based to make the project technically feasible. In this sense, this work aims to present the variation of the bearing capacity of a square footing of 2.00 m on a side, based on different proportions of soil-cement, by the methods of Terzaghi (1943), Meyerhof (1955), Hansen (1970) and Vesic (1975), which are widely consolidated in the literature. For this purpose, static triaxial compression tests were performed on samples composed of improved sand with cement contents of 2%, 5% and 10%, in which their respective cohesion and angle of internal friction were determined. It was concluded that even for low levels of cement, the gain in load capacity is considerable, which may enable the execution of this type of foundation in places where the soil resistance is low, or, decrease the footing dimensions, depending on the case. It is recommended to realize studies using reduced models to verify the behavior of these foundations.

**KEYWORDS:** Bearing capacity. Shallow foundations. Soil-cement. Soil improvement. Static triaxial compression test.

## 1 Introdução

Em engenharia geotécnica, os solos com camadas que possuem elevada tendência a deformabilidade e baixa capacidade de carga apresentam-se como uma das questões a serem discutidas e solucionadas na elaboração e execução de projetos de fundações. Considerando tal circunstância, é preciso buscar soluções que, por vezes, podem apresentar custos mais elevados ou mesmo, que necessitem de equipamentos específicos para sua execução, como é o caso das fundações por estacas, o que, em muitos casos, torna-se inviável. Nessas situações, alternativas devem ser avaliadas, para que, viabilize um projeto de fundações que não negligencie a segurança e possibilite a sua execução, em virtude das variáveis que envolvem a problemática. Uma das alternativas que pode ser considerada, é o melhoramento das características mecânicas do solo misturando-o de forma padrão, com materiais que aumentem a capacidade de carga do terreno em que as fundações superficiais serão assentes, entre eles, as fibras, a cal e o cimento, sendo este último, gerador de um material conhecido como solo-cimento.

A técnica de melhoramento de solos com solo-cimento vem ganhando adeptos dentro da comunidade geotécnica, e portanto, tem sido muito utilizada. Algumas das áreas da engenharia geotécnica que vem empregando com muito sucesso tal metodologia são a rodoviária, na construção de bases para pavimentos, de barragens, nas contenções de taludes de terra, de aterros no controle de contaminantes e de fundações no aumento da capacidade de carga para utilização, sempre que possível, de estruturas superficiais.

Nesse sentido, este trabalho tem por objetivo apresentar a variação da capacidade de carga de uma sapata quadrada de 2,00m de lado, assente em diferentes proporções de solo-cimento, pelos métodos de Terzaghi (1943), Meyerhof (1955), Hansen (1970) e Vesic (1975), que são amplamente consolidados na literatura. Para tal, realizou-se ensaios de compressão triaxial estático em amostras compostas por areia melhorada com teores de cimento de 2%, 5% e 10%, no qual determinou-se seus respectivos ângulos de atrito e coesão.

## 2 Melhoramento de Solos com Solo-Cimento

As técnicas de melhoramento de solo de fundações são aplicadas quando o solo não apresenta características de resistência aceitáveis para projeto. Com isso, a técnica de utilização de solo-cimento é realizada com o intuito de obter materiais geotécnicos que sejam compatíveis para estruturas de obras civis no geral, como fundações superficiais, como comenta Consoli (2003). De forma técnica, o solo-cimento é definido de acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2002) como o material resultante da mistura homogênea, compactada e curada de solo, cimento e água em proporções adequadas.

Outro aspecto de considerável relevância é que o uso da técnica do solo-cimento reduz notavelmente a quantia de recursos naturais empregados no processo de construção. Com aproximadamente 90% do solo-cimento sendo material que pode ser obtido no local da obra (solo), somente cerca de 10% (cimento) requer transporte para o local. O consumo reduzido de recursos naturais também reduz a quantia de tráfego, poluição e danos globais para o meio-ambiente (PCA, 2002).

## 3 Parâmetros de Resistência dos Solos

A resistência ao cisalhamento dos solos, dada pela Equação 1, desenvolvida por Terzaghi, é função dos parâmetros de resistência, que são o ângulo de atrito ( $\phi$ ) e a coesão ( $c$ ).

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan\phi \quad (1)$$

Onde:  $\tau$  é a tensão cisalhante (kPa),  $c$  é a coesão (kPa),  $\sigma$  é a tensão normal (kPa) e  $\phi$  é o ângulo de atrito ( $^\circ$ ).

Para determinar a tensão cisalhante, é necessário determinar os parâmetros de resistência, que são obtidos a partir do ensaio de cisalhamento direto ou pelo ensaio de compressão triaxial estático. A Figura 1 indica o comportamento das tensões atuantes na superfície de resistência de Mohr-Coulomb, considerando três condições de confinamento, gerando assim, a envoltória do comportamento resistente do solo, hipoteticamente ensaiado.

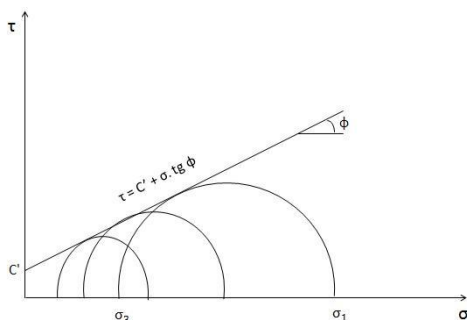


Figura 1. Critério de escoamento de Mohr-Coulomb. Fonte: Bastos (2017).

Os autores Clough *et al.* (1981) e Schnaid *et al.* (2001) explicam que, para solos artificialmente cimentados, o grau de cimentação geralmente aumenta a coesão, enquanto que, o ângulo de atrito não é afetado significativamente por tal cimentação. Os autores Lade e Overton (1989), baseados em resultados de ensaios triaxiais em solo cimentado, verificaram, em sua pesquisa, que o aumento do teor de cimento gerou um aumento do intercepto coesivo  $c$ , e, também, do ângulo de atrito. O aumento do ângulo de atrito foi observado apenas para valores baixos de tensões confinantes; para tensões elevadas, os resultados de ângulo de atrito obtidos para o solo com e sem cimento foram praticamente os mesmos.

#### 4 Previsão de Capacidade de Carga de Fundações Superficiais

A estimativa da capacidade de carga de fundações superficiais pode ser realizada empregando formulações teóricas e também de forma experimental, através da execução e avaliação de ensaios de provas-de-carga em placa. Dentre os diversos métodos teóricos publicados em literatura técnico-científica, pode-se citar as análises realizadas por Terzaghi (1943), Meyerhof (1955), Hansen (1970) e Vesic (1975).

##### 4.1 Terzaghi (1943)

A teoria de Terzaghi (1943) com modificações posteriores, para o cálculo da capacidade de carga de fundações foi desenvolvida baseada inicialmente nos estudos de Prandtl (1920) para metais. Terzaghi (1943) aplicou a metodologia para fundações em solos com atrito e coesão ( $c$ ,  $\phi$ ), solos não coesivos ou granulares ( $c = 0$ ) e solos puramente coesivos ( $\phi = 0$ ). Considerando fundação superficial com base quadrada, o método é expresso pela Equação 2, em que o termo  $cN_c$  representa a parcela de coesão do solo em contato com a fundação,  $\gamma DN_q$  considera a sobrecarga de solo acima da cota de assentamento e  $0,8\gamma BN_\gamma$  acresce a parcela de atrito do solo/fundação.

$$q_{ult} = c \cdot N_c + \gamma \cdot D \cdot N_q + \gamma \cdot \frac{B}{2} \cdot N_\gamma \quad (2)$$

Onde:  $q_{ult}$  é a capacidade de carga última (kPa),  $c$  é a coesão (kPa),  $\gamma$  é o peso específico do solo (kN/m<sup>3</sup>),  $D$  é a profundidade de embutimento da base da fundação (m),  $B$  é a largura da fundação (m) e  $N_c$ ,  $N_q$  e  $N_\gamma$  são fatores de capacidade de carga que podem ser obtidos a partir do ábaco da Figura 2.

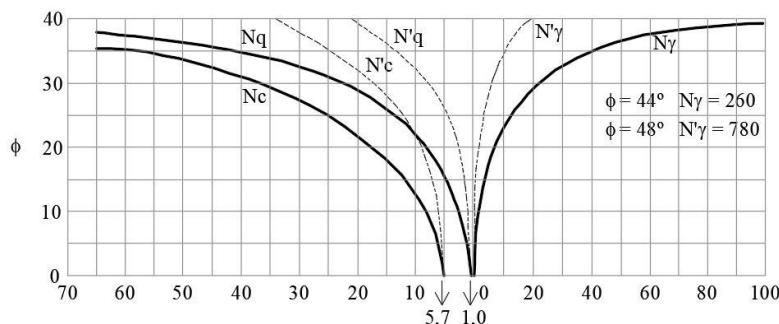


Figura 2. Ábaco para a obtenção dos fatores de capacidade de carga pelo método de Terzaghi (1943).  
 Fonte: Adaptado de Terzaghi e Peck (1948).

## 4.2 Meyerhof (1955)

A teoria de Meyerhof (1955) foi proposta como um aperfeiçoamento da teoria de Terzaghi, mas incluindo fatores de forma, profundidade e inclinação da fundação, buscando por resultados mais próximos da realidade, já que considera mais variáveis. A Equação 3 apresenta a expressão referente ao método para sapatas quadradas.

$$q_{ult} = 1,3 \cdot c \cdot N_c + \gamma \cdot D \cdot N_q + 0,8 \cdot \gamma \cdot \frac{B}{2} \cdot N_\gamma \quad (3)$$

Onde  $q_{ult}$  é a capacidade de carga última (kPa),  $c$  é a coesão (kPa),  $\gamma$  é o peso específico do solo (kN/m<sup>3</sup>),  $D$  é a profundidade de embutimento da base da fundação (m),  $B$  é a largura da fundação (m) e  $N_c$ ,  $N_q$  e  $N_\gamma$  são fatores de capacidade de carga, análogos ao método de Terzaghi (1943).

## 4.3 Hansen (1970)

A teoria de Hansen (1970) foi baseada nos estudos realizados por Meyerhof (1955), a qual contribuiu para o cálculo de capacidade de carga das fundações submetidas a um carregamento qualquer, levando em consideração fatores de inclinação da carga, inclinação da base da fundação e inclinação do terreno, como mostra a Equação 4.

$$q_{ult} = \frac{Q_{ult}}{A'} = c \cdot N_c \cdot s_c \cdot d_c \cdot i_c \cdot b_c \cdot g_c + q \cdot N_q \cdot s_q \cdot d_q \cdot i_q \cdot b_q \cdot g_q + \frac{B'}{2} \cdot \gamma \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot d_\gamma \cdot i_\gamma \cdot b_\gamma \cdot g_\gamma \quad (4)$$

Onde:  $A'$  é a área efetiva da fundação (m<sup>2</sup>),  $c$  é a coesão (kPa),  $q$  é o carregamento qualquer recebido pela fundação (kN),  $\gamma$  é o peso específico do solo (kN/m<sup>3</sup>),  $B'$  é a largura da fundação (m) e  $N_c$ ,  $N_q$  e  $N_\gamma$  são fatores de capacidade de carga,  $s_c$ ,  $s_q$  e  $s_\gamma$  são os fatores de forma,  $d_c$ ,  $d_q$  e  $d_\gamma$  são os fatores de profundidade,  $i_c$ ,  $i_q$  e  $i_\gamma$  são os fatores de inclinação da carga,  $b_c$ ,  $b_q$  e  $b_\gamma$  são os fatores de inclinação da base da fundação,  $g_c$ ,  $g_q$  e  $g_\gamma$  são os fatores de inclinação do terreno.

## 4.4 Vesic (1975)

A teoria de Vesic (1975) permaneceu com a mesma formulação de Hansen (1970). Os fatores de capacidade de carga devido à coesão e à sobrecarga continuaram iguais, porém, o cálculo do fator de capacidade de carga devido ao peso próprio foi alterado, sendo dado em função do fator de capacidade de sobrecarga e ângulo de atrito, conforme expresso na Equação 5.

$$q_{ult} = \frac{Q_{ult}}{A'} = c \cdot N_c \cdot s_c \cdot d_c \cdot i_c \cdot b_c \cdot g_c + q \cdot N_q \cdot s_q \cdot d_q \cdot i_q \cdot b_q \cdot g_q + \frac{B'}{2} \cdot \gamma \cdot 2 \cdot (N_q + 1) \cdot \tan \phi \cdot s_\gamma \cdot d_\gamma \cdot i_\gamma \cdot b_\gamma \cdot g_\gamma \quad (5)$$

Onde:  $A'$  é a área efetiva da fundação ( $m^2$ ),  $c$  é a coesão (kPa),  $q$  é o carregamento qualquer recebido pela fundação (kN),  $\gamma$  é o peso específico do solo ( $kN/m^3$ ),  $B'$  é a largura da fundação (m),  $\phi$  é o ângulo de atrito do solo, e  $N_c$  e  $N_q$  são fatores de capacidade de carga,  $s_c$ ,  $s_q$  e  $s_\gamma$  são os fatores de forma,  $d_c$ ,  $d_q$  e  $d_\gamma$  são os fatores de profundidade,  $i_c$ ,  $i_q$  e  $i_\gamma$  são os fatores de inclinação da carga,  $b_c$ ,  $b_q$  e  $b_\gamma$  são os fatores de inclinação da base da fundação,  $g_c$ ,  $g_q$  e  $g_\gamma$  são os fatores de inclinação do terreno.

## 5 Resultados

Com a finalidade de prever a capacidade de carga de fundações superficiais, realizou-se ensaios de compressão triaxial estático em amostras de solo, classificadas segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) como areia fina, uniforme e de baixa plasticidade, melhoradas com cimento em teores de 2%, 5% e 10%, obtendo os parâmetros de resistência em cada uma das condições, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Resultados dos parâmetros de resistência obtidos do ensaio de compressão triaxial estático.

Teor de Cimento na Amostra de Solo	Ângulo de atrito $\phi$ (°)	Coesão $c$ (kPa)
0%	31	0,00
2%	34	83,69
5%	38	210,80
10%	47	422,60

Fonte: Autor (2020).

A Figuras 3, 4 e 5 apresentam os círculos de Mohr e as envoltórias de Coulomb obtidas a partir dos ensaios de compressão triaxiais estáticos para as amostras melhoradas com 2%, 5% e 10% de cimento, respectivamente.

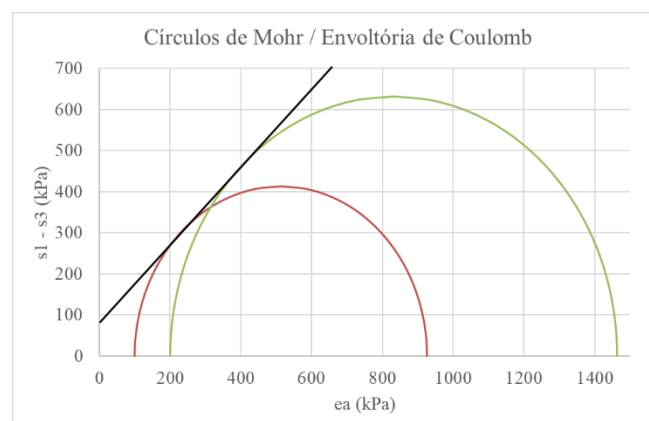


Figura 3. Envoltória de Mohr-Coulomb com 2% de solo-cimento. Fonte: Autor (2020).

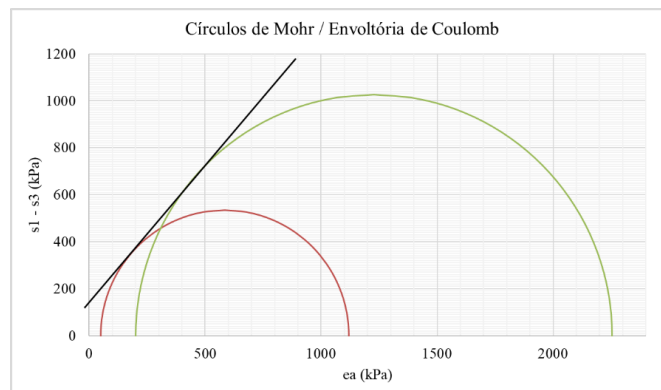


Figura 4. Envoltória de Mohr-Coulomb com 5% de solo-cimento. Fonte: Autor (2020).

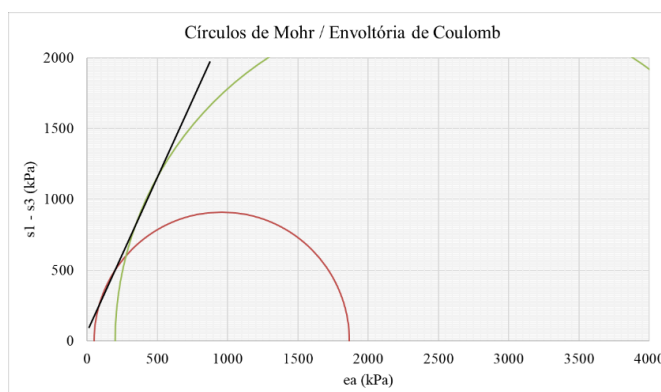


Figura 5. Envoltória de Mohr-Coulomb com 10% de solo-cimento. Fonte: Autor (2019).

A partir desses resultados, realizou-se a previsão da capacidade de carga de uma fundação superficial por sapata, hipotética, de base quadrada, com 2,00 m de lado, pelos métodos de Terzaghi (1943), Meyerhof (1955), Hansen (1970) e Vesic (1975), conforme apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados das capacidades de carga de acordo com cada método e respectivos teores de cimento.

Teor de Cimento na Amostra de Solo	Capacidade de Carga (kPa)			
	Terzaghi (1943)	Meyerhof (1955)	Hansen (1970)	Vesic (1975)
0%	688,94	716,64	497,09	604,87
2%	6556,69	7.450,99	7.053,58	6.623,06
5%	23.780,80	29.461,51	27.572,62	25.530,99
10%	141.269,64	220.772,58	185.082,65	170.994,45

Fonte: Autor (2020).

A Figura 6 apresenta o crescimento da capacidade de carga em função do teor de cimento utilizado nas previsões, para os métodos de Terzaghi (1943), Meyerhof (1955), Hansen (1970) e Vesic (1975).

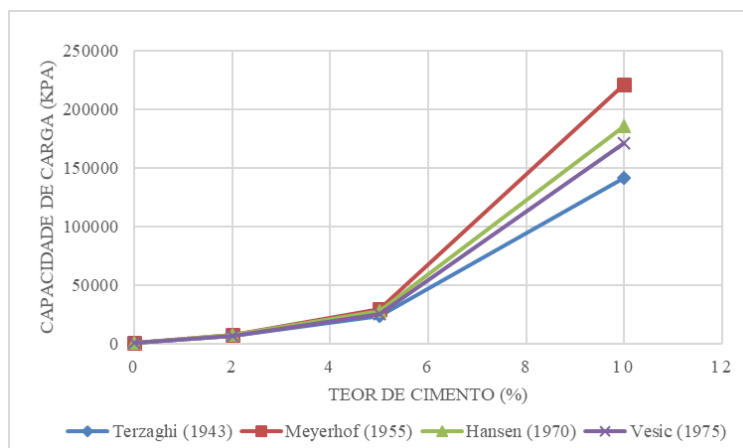


Figura 6. Gráfico do teor de cimento x capacidade de carga. Fonte: Autor (2020).

Desse modo, observa-se que, houve um aumento considerável para todos os métodos quando considerou-se os diferentes teores de cimento, havendo um acréscimo de 205 vezes para o teor de 10%, em relação ao solo em sua condição natural, para o método de Terzaghi (1943), enquanto que o menor acréscimo foi para o teor de 2%, na ordem de 9,5 vezes em relação ao solo natural também para o método de Terzaghi (1943).

## 6 Conclusão

Os ensaios de resistência à compressão triaxial mostraram que o aumento da quantidade de cimento adicionada ao solo proporciona ganhos expressivos de resistência. Como esperado, os resultados obtidos apresentam uma boa correlação com o teor de cimento, aumentando exponencialmente em função do aumento deste parâmetro. O aumento do teor de cimento das amostras proporcionou um aumento dos parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb ( $c$ ,  $\phi$ ).

A coesão efetiva variou de 0 a 422,6 kPa, enquanto o ângulo de atrito efetivo variou de  $31^\circ$  a  $48^\circ$ . Os resultados obtidos mostram que a utilização de camadas artificialmente cimentadas eleva consideravelmente a capacidade de suporte do solo, necessário para execução de uma edificação em geral e, conseqüentemente, o fator de segurança da fundação. Com isso, a execução de fundações superficiais, em substituição a fundações profundas, pode tornar-se uma opção viável.

É válido salientar que, para a obtenção da capacidade de carga pelas equações mencionadas neste trabalho, é necessário que todos os demais fatores que compõem a sentença sejam determinados. É possível se verificar que a exceção do  $\gamma$ ,  $B$ ,  $D$  e dos fatores de forma (sapata quadrada) todos os demais fatores variam seu valor significativamente com os parâmetros de resistência, que por sua vez não são constantes e variam com o incremento de teor de cimento.

Considerando o potencial de expansão do conhecimento operacional e técnico do emprego de misturas solo-cimento em obras de fundações superficiais, recomenda-se a realização de estudos de caso para definição de procedimentos executivos de homogeneização e compactação dos componentes da mistura, assim como a definição de espessuras de troca de solo. Para o solo analisado neste estudo, Ingles e Metcalf (1972) indicam a adição de cimento em porcentagem de 4 a 6%, enquanto critérios operacionais de compactação podem ter como balizador os preceitos da NBR 12023/1992 (ABNT, 1992).

Recomenda-se, ainda, a realização de estudos de viabilidade financeira, para que sejam comparadas as soluções por melhoramento do solo com as soluções em fundações profundas, a fim de avaliar, para cada caso, qual melhor se adequa as condições de campo.

## AGRADECIMENTOS

Agradece-se ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará pela bolsa do autor<sup>3</sup> e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa do autor<sup>4</sup>.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1992). NBR 12023 – *Solo-cimento - Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP (2002). *Guia Básico de Utilização do Cimento Portland*. 7.ed. São Paulo, pp.28
- Bastos, I. J. F. S. (2017) *Uma Proposta de Envoltória de Resistência ao Cisalhamento para Solos Arenosos Artificialmente Cimentados na Região Metropolitana de Fortaleza*. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Dissertação de mestrado, Área de concentração Geotecnia. Universidade Federal do Ceará.
- Clough, G. W.; Sitar, N.; Bachus, R. C.; Rad, N. S. (1981) *Cemented sands under static loading*. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, New York. ASCE, v.107, n.GT6, p.799-817.
- Consoli, N. C.; Vendruscolo, M. A.; Prietto, P. D. M. (2003) *Behavior of plate load tests on soil layers improved with cement and fiber*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. New York: ASCE, v. 129, n. 1, p. 96-101.
- Hansen, J. B. (1970) *A revised and extended formula for bearing capacity*. Geoteknisk Institut, Bulletin n. 28, p. 5-11.
- Ingles, O. G.; Metcalf, J. B. *Soil stabilization – principles and practice*. Australia: Butterworths Pty. Limited, 366 p, 1972.
- Lade, P. V.; Overton, D. D. (1989) *Cementation effects in frictional materials*. *Journal of Geotechnical Engineering*, New York: ASCE, v. 115, n.10, p.1373-1387.
- Meyerhof, G. G. (1955) *Influence of roughness of base and ground-water conditions on the ultimate bearing capacity of foundations*. *Géotechnique*, v. 5, n. 3, p.227-242.
- Portland Cement Association - PCA. (2002) *Soil-Cement for Water Resources Applications*. Soil-Cement Solutions, Report PL072.01. 8p.
- Prandtl, L. (1920) *Über die Härte plastischer Körper*. *Nachr: Kgl. Ges. Wiss. Göttingen, Math. Phys. Klasse*.
- Schnaid, F.; Prietto, P. D. M.; Consoli, N. C. (2001). *Prediction of cemented sand behavior in triaxial compression*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, New York: ASCE, v.127, n.10, p.857-868.
- Terzaghi, K. (1943) *Theoretical soil mechanics*, John Wiley & Sons, New York.
- Terzaghi, K.; Peck, R. B. (1948) *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons, Hoboken.
- Vesic, A. S. (1975) *“Bearing capacity of shallow foundations”*. In: *Foundation Engineering Handbook*, New York, McGraw-Hill, pp.121-147.