

COMPARAÇÃO DE VALORES DE CAPACIDADE DE CARGA E TENSÃO ADMISSÍVEL EM SOLO ARENOSO ESTIMADOS POR DIFERENTES MÉTODOS

Arthur T. Fonseca¹, Pedro H. S. Silva², Yuri D. J. Costa², Carina M. L. Costa²

¹Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, Brasil
(arthurtauan23@hotmail.com)

²Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, Brasil

Resumo: Este artigo apresenta a comparação de valores de capacidade de carga e tensão admissível estimados para uma placa de 80 cm de diâmetro em solo arenoso. Os métodos de Terzaghi, de Teixeira e do Architectural Institute of Japan foram usados para estimar valores para sistema solo-placa. Os valores estimados foram comparados à valores obtidos a partir de resultados de ensaios de prova de carga em placa (PCP). O método de Teixeira estimou valores mais próximos aos obtidos a partir dos ensaios de PCP.

Palavras-chave: Análise Comparativa; Métodos de Estimativa; Capacidade de Carga; Tensão Admissível; Solo arenoso

INTRODUÇÃO

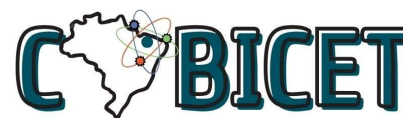
A NBR 6122 (ABNT, 2019a), que trata de projeto e execução de fundações, recomenda que a capacidade de carga do solo para fundações diretas seja determinada utilizando métodos teóricos, métodos semiempíricos e/ou ensaios de prova de carga em placa (PCP). A norma também recomenda a adoção da metodologia do fator de segurança global, que varia de acordo com o método utilizado para calcular a capacidade de carga, para definir a tensão admissível do solo.

Os métodos teóricos se baseiam na compressibilidade e resistência ao cisalhamento do solo e foram desenvolvidos a partir de considerações e simplificações específicas, concentrando seus conceitos e suas formulações ao comportamento do solo como areia ou argila, não fazendo ressalva quanto ao estado ou à granulometria do solo (Ruver, 2005). Por outro lado, os métodos semiempíricos se baseiam em correlações desenvolvidas a partir dos resultados de ensaios de campo para estimar a capacidade de carga ou a tensão admissível do solo (Cintra et al., 2011). Os ensaios de PCP, por sua vez, simula, em escala reduzida, o comportamento real do sistema de fundação direta a partir da compressão de uma placa metálica rígida sobre a superfície do terreno ou em determinada profundidade, permitindo a plotagem de uma curva tensão-recalque e a determinação da capacidade de carga e, conseqüentemente, da tensão admissível do solo (Cintra et al., 2011).

Uma vez que os métodos teóricos se baseiam em considerações e simplificações específicas, que não necessariamente se aplicam a todos os casos (Cintra et al., 2011), e os métodos semiempíricos baseiam-se em ensaios de campo, que podem sofrer influência de diversos fatores (Schnaid e Odebrecht, 2012), a estimativa da capacidade de carga e tensão admissível do solo usando esses métodos pode não condizer com os valores obtidos por ensaios de PCP (Araújo, 2016).

Cudmani (1994) realizou 18 ensaios de PCP em solo areno-argiloso e comparou a capacidade de carga e a tensão admissível obtidas a partir dos ensaios com valores estimados pelo método teórico de Terzaghi (1943). Os resultados mostraram que os valores estimados pelo método de Terzaghi (1943) foram superiores aos valores obtidos pelos ensaios de PCP.

Soares Júnior (2003) realizou um programa de ensaios de campo, composto por ensaios de prova de carga em sapata rígida quadrada, pressiométrico de Ménard (PMT) (Ménard, 1955), dilatométrico de Marchetti (DMT) (Marchetti, 1980) e de sondagem a percussão com medida do índice de resistência a penetração do solo (N_{SPT}), em solo argilo-arenoso para definir a tensão admissível do sistema solo-sapata. O autor comparou os valores obtidos com os valores estimados a partir do método teórico de Terzaghi (1943) e dos métodos semiempíricos de Ménard (1963) e Teixeira e Godoy (1998), e observou que o método de Terzaghi (1943) subestimou a tensão admissível em 24% enquanto os métodos de Ménard (1963) e Teixeira e Godoy



(1998) subestimaram a tensão admissível em 21% e 32%, respectivamente, quando comparado aos valores obtidos a partir dos ensaios de prova de carga realizado na sapata.

Duarte (2006) examinou métodos teóricos e semiempíricos na determinação da capacidade de carga de fundações superficiais a partir de um ensaio de prova de carga realizado em uma sapata rígida quadrada assente em solo argiloso. Os métodos teóricos de Terzaghi (1943) e Meyerhof (1951) e o método semiempírico de Meyerhof (1951) superestimaram a capacidade de carga do sistema solo-sapata em cerca de 66%, 132% e 300%, respectivamente, quando comparados ao valor obtido a partir do ensaio de prova de carga realizado na sapata. Por outro lado, o método semiempírico de Teixeira e Godoy (1998) se mostrou o mais satisfatório dos métodos comparados, apresentando uma diferença de cerca de 18%.

Noguchi (2012) analisou diversas metodologias utilizadas para se estimar a capacidade de carga de uma placa circular com 0,50 m² de área em solo argiloso. O autor comparou valores de capacidade de carga calculados a partir de simulações numéricas, usando o método dos elementos finitos (MEF), e métodos teórico e semiempírico com valores obtidos por meio de resultados de ensaios de PCP. Os resultados mostraram que o MEF e os métodos teórico e semiempírico produziram valores de capacidade de carga similares aos obtidos nos ensaios de PCP. Por outro lado, quando analisados em termos de tensão admissíveis, ficou evidente que todos os métodos estudados subestimaram o potencial resistente do sistema solo-placa. Segundo o autor, dentre os métodos analíticos, o método teórico de Terzaghi (1943) apresentou o melhor resultado na estimativa da capacidade de carga do solo, mas demonstrou um resultado aquém para a tensão admissível, o que sugere a possibilidade de redução do fator de segurança global adotado.

Em contrapartida, ao estudar o comportamento das tensões admissíveis em solos arenosos de baixa capacidade a partir do ensaio de PCP, Medeiros (2013) observou que o método teórico de Terzaghi (1943) se mostrou arrojado ao estimar tensões superiores àquelas obtidas a partir do ensaio de PCP. Os métodos semiempíricos de Terzaghi e Peck (1948) e de Meyerhof (1951), no entanto, apresentaram valores menores, sendo considerados conservadores. Medeiros (2013) desaconselha que se utilize apenas ensaios de sondagens para avaliar o comportamento resistente do solo, mesmo quando aplicadas as correções de energia ao N_{SPT} , sendo preferível realizar, em conjunto, ensaios de PCP para aferir os resultados calculados.

Gomes et al. (2020), ao estudarem o comportamento de um solo arenoso através de ensaios de PCP, obtiveram uma tensão admissível de 300 kPa, a qual apresentava uma diferença percentual máxima de 69% em relação ao método teórico de Terzaghi (1943) e 53% ao método semiempírico de Skempton (1951). Além disso, os autores observaram que ambas as metodologias se mostraram extremamente conservadoras. Comportamento semelhante foi notado por Bezerra (1990), ao estimar a capacidade de carga de um solo com ruptura local a partir do método teórico de Terzaghi (1943) e compará-la com os valores de campo obtido através de ensaios de PCP.

Alexandre (2021) estudou a variabilidade existente entre o método teórico de Terzaghi (1943) e os métodos semiempíricos de Teixeira (1996) e Terzaghi e Peck (1948) mediante à análise de ensaios de PCP em solo arenoso. Os ensaios foram realizados em placa com diâmetro de 0,80 m assente em uma profundidade de 0,50 m. Os resultados mostraram uma disparidade relevante entre os valores de capacidade de carga estimados a partir dos métodos de cálculo e os obtidos pelos ensaios. Ainda, segundo o autor, essa divergência está relacionada ao fato de que as metodologias convencionais foram desenvolvidas em regiões com características de solo específicas, o que pode não representar fielmente as condições do solo em regiões com características de solo distintas. Alexandre (2021), nesse sentido, conclui que a engenharia geotécnica se encontra distante de ser considerada uma ciência exata e que, por esse motivo, erros inerentes às variações de comportamento do solo podem resultar em imprevistos.

A estimativa da capacidade de carga e tensão admissível do solo usando métodos teóricos e semiempíricos tem resultado em valores variados em comparação aos valores calculados a partir de resultados de ensaios de PCP, o que desperta a necessidade de analisar a empregabilidade desses métodos para diversos solos em diferentes regiões.

Diante do exposto, o presente trabalho apresenta uma comparação dos valores de capacidade de carga e de tensão admissível estimados pelos métodos teórico e semiempírico com os valores obtidos a partir de ensaios de PCP em um solo arenoso localizado no estado do Rio Grande do Norte. Para isso, utilizou-se um banco de dados composto de resultados de sondagens à percussão com medida de N_{SPT} para se estimar os parâmetros necessários para emprego das formulações teórica e semiempírica, bem como resultados de ensaios de PCP a fim de se determinar a capacidade de carga e a tensão admissível do sistema solo-placa e compará-los com os valores estimados.

MATERIAL E MÉTODOS

A capacidade de carga e a tensão admissível de uma placa circular com diâmetro de 80 cm assente sobre solo arenoso foram calculadas a partir de 32 ensaios de PCP e 32 sondagens à percussão com medida de N_{SPT} realizados em duas regiões (B33 e B61) destinadas à construção de fundações diretas para suporte de aerogeradores. As sondagens foram realizadas antes da escavação do local e as provas de cargas foram realizadas no fundo da cava em que as fundações estariam assentes, a uma profundidade de 2,5 m da superfície do terreno. O subsolo local nas duas regiões é composto por uma areia siltosa com granulometria e compacidade variáveis. No momento da investigação do subsolo, o nível de água não foi encontrado e a profundidade das sondagens variou entre 25 m e 35 m.

Os ensaios de PCP foram realizados em placas circulares de aço rígidas com diâmetro de 80 cm, segundo as recomendações da NBR 6489 (ABNT, 2019b). Para a montagem dos ensaios, nivelou-se o fundo da cava e, em seguida, posicionou-se a placa, o cilindro hidráulico e uma rótula para a conservação da normalidade dos carregamentos. As tensões foram aplicadas com o auxílio de um cilindro hidráulico com capacidade de 500 kN, alimentado por uma bomba manual, e medidas a partir de um manômetro analógico. Os recalques da placa foram medidos por meio de quatro relógios comparadores analógicos com resolução de 0,01 mm e curso de 30 mm. Os relógios foram instalados diametralmente opostos, em vigas metálicas rígidas de referência, com o auxílio de bases magnéticas articuláveis. As vigas de referência tinham um comprimento de 3 m cada e foram dispostas transversalmente ao eixo de aplicação da tensão. Todos os dispositivos foram calibrados antes dos ensaios para garantir a precisão das medidas.

A fase de carregamento dos ensaios foi dividida em 10 estágios sucessivos com uma tensão de 36 kPa e 48 kPa, totalizando uma tensão máxima de 360 kPa e 480 kPa, para as regiões B33 e B61, respectivamente. Em cada estágio de carregamento, os recalques foram medidos imediatamente após a aplicação da tensão e após intervalos de tempo sucessivamente dobrados. As mudanças de estágios de carregamento ocorreram após a estabilização dos recalques ou quando um período de 30 minutos foi atingido. Após ser atingida a estabilização dos recalques no último estágio, a tensão máxima foi mantida por um período de 12 horas e, em seguida, o sistema foi descarregado em 4 estágios com tensão correspondente a 25% da tensão máxima aplicada. Os estágios de descarregamento foram mantidos por um tempo mínimo de 30 minutos até atingir o descarregamento total. As Figuras 1 e 2 apresentam as curvas tensão-recalque obtidas durante

a fase de carregamento dos ensaios de PCP para as regiões B33 e B61, respectivamente.

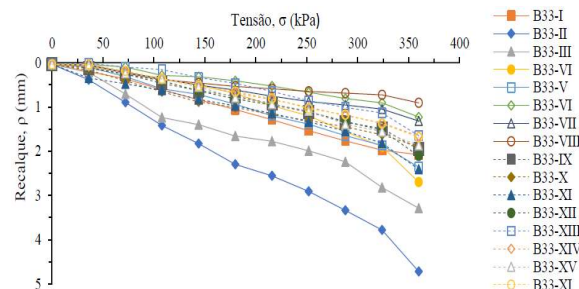


Figura 1. Curvas tensão x recalque da região B33.

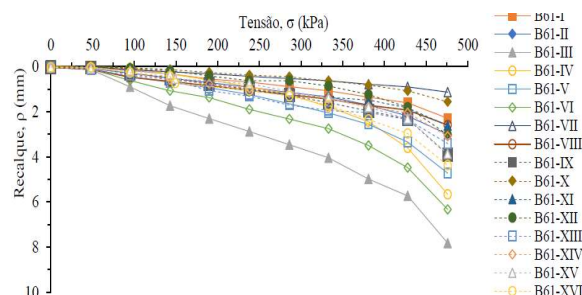


Figura 2. Curvas tensão x recalque da região B61.

As curvas tensão-recalque apresentadas nas Figuras 1 e 2 mostraram que os ensaios de PCP não apresentaram ruptura física. Por esse motivo, um método proposto por Van der Veen (1953) para extrapolar curvas carga-recalque de ensaios de prova de carga em estacas foi aplicado para determinar as tensões de ruptura dos ensaios de PCP. O método se baseia na obtenção da carga de ruptura de estacas através do ajuste da curva carga-recalque a partir do emprego de expressões matemáticas (Cintra et al., 2013). Nesse caso, para a aplicação do método, definiu-se que a tensão de ruptura (σ_r) é a tensão que resulta em uma reta no gráfico com abscissa $-\ln(1 - (\sigma/\sigma_r))$ e ordenada ρ , onde \ln é o logaritmo natural, σ é a tensão aplicada e ρ é o recalque medido. Dessa forma, a curva tensão-recalque pode ser representada pela Equação (1):

$$\sigma = \sigma_r(1 - e^{-\alpha\rho}) \quad (1)$$

onde e é o número de Euler e α é o coeficiente angular da reta no gráfico $-\ln(1 - (\sigma/\sigma_r))$ x ρ .

Após a definição de σ_r para todos os ensaios de PCP, as tensões admissíveis foram calculadas dividindo σ_r por um fator de segurança (FS) global de 2, conforme recomendação da NBR 6122 (ABNT, 2019a) para os casos em que a capacidade de carga é obtida a partir de ensaios de PCP.

Os valores de capacidade de carga e tensão admissível também foram calculados usando o método teórico de Terzaghi (1943), com as contribuições de Vesic (1975), e os métodos

semiempíricos do Architectural Institute of Japan (AIJ) (2001) e de Teixeira (1996).

O método de Terzaghi (1943), com as contribuições de Vesic (1975), estima σ_r a partir de diferentes mecanismos de ruptura do solo, os quais dependem a rigidez do maciço e da cota de assentamento da fundação (Cintra et al., 2011). Nesse método, σ_r é estimado pela Equação (2) (Cintra et al., 2011):

$$\sigma_r = cN_cS_c + qN_qS_q + 0,5\gamma BN_\gamma S_\gamma \quad (2)$$

onde c é a coesão do solo, q é a sobrecarga efetiva de solo na cota de apoio da fundação, γ é o peso específico do solo, B é a menor dimensão da fundação, N_c , N_q e N_γ são fatores de capacidade de carga, e S_c , S_q e S_γ são fatores de forma.

A Equação (2) é utilizada para solos que apresentam mecanismo de ruptura geral, como areias compactas e argilas rijas (Terzaghi, 1943). Na ocorrência de ruptura por punção, comum em argilas moles e areias fofas, Terzaghi (1943) recomenda uma redução nos parâmetros de resistência do solo, o que reduz os valores dos fatores de capacidade de carga e de forma. Já no caso de uma ruptura localizada, comum em areias medianamente compactas e argilas médias, Cintra et al. (2011) aconselham que se determine a valor médio da tensão de ruptura para os mecanismos de ruptura geral e de ruptura por punção.

O método do AIJ (2001) foi desenvolvido a partir do método de Terzaghi (1943) e é amplamente empregado no Japão, uma vez que apresenta grande eficácia na consideração do efeito da dimensão da fundação na estimativa da capacidade de carga (Du et al., 2016). Nesse método, σ_r é estimado pela Equação (3) (Du et al., 2016):

$$\sigma_r = cN_c i_c + qN_q i_q + 0,5\gamma\eta BN_\gamma i_\gamma \quad (3)$$

onde i_c , i_q e i_γ são fatores de inclinação da carga em relação ao plano vertical e η é o fator do efeito da dimensão da fundação calculado pela Equação (4) (Du et al., 2016):

$$\eta = (B/B_0)^{-1/3} \quad (4)$$

onde B_0 é o valor de referência na largura da fundação.

Os cálculos para a estimativa da capacidade de carga usando o método de Terzaghi (1943), com as contribuições de Vesic (1975), e do AIJ (2001) foram realizados considerando as mesmas condições de execução dos ensaios de PCP. Os mecanismos de ruptura e os parâmetros do solo foram definidos a partir do índice de resistência à penetração médio (\bar{N}_{SPT}) dentro do bulbo de tensões da placa, assumido estar dentro de uma profundidade (z) da cota de assentamento da placa igual a duas vezes o diâmetro

(D) da placa conforme sugerido por Cintra et al. (2011). Ruptura por punção foi adotada para valores de \bar{N}_{SPT} menor que 9, enquanto ruptura geral foi assumida para valores de \bar{N}_{SPT} maior que 18. Para valores de \bar{N}_{SPT} entre 9 e 18, considerou-se ruptura localizada.

O peso específico das camadas de solo foi determinado a partir da correlação de γ com o \bar{N}_{SPT} proposta por Godoy (1972). O ângulo de atrito interno efetivo (ϕ') das camadas de solo foi calculado segundo a Equação (5) (Godoy, 1983).

$$\phi' = 28^\circ + 0,4\bar{N}_{SPT} \quad (5)$$

A sobrecarga efetiva da camada de solo acima da cota de assentamento da placa foi calculada multiplicando o γ da camada de solo pela espessura (h) da camada de solo. Os fatores de capacidade de carga e de forma foram determinados segundo Vesic (1975) e os fatores de inclinação foram determinados de acordo com Meyerhof (1951; 1963). O valor de B foi adotado igual ao diâmetro da placa usada nos ensaios de PCP (0,8 m) e o valor de B_0 foi adotado igual a 1 m, conforme Araújo (2016).

Por se tratar de um solo predominantemente arenoso, a contribuição da coesão na estimativa da capacidade de carga foi desprezada e a estimativa foi feita assumindo uma condição de ruptura drenada. As tabelas 1 e 2 apresentam os parâmetros adotados para estimar σ_r nas regiões B33 e B61, respectivamente.

Tabela 1. Parâmetros adotados para estimar σ_r (B33).

| Base | \bar{N}_{SPT} | ϕ' (°) | γ (kN/m ³) | q (kPa) |
|----------|-----------------|-------------|-------------------------------|-----------|
| B33-I | 32,0 | 40 | 18 | 43 |
| B33-II | 23,7 | 37 | 18 | 45 |
| B33-III | 13,8 | 33 | 17 | 43 |
| B33-IV | 11,7 | 32 | 17 | 43 |
| B33-V | 4,3 | 29 | 16 | 40 |
| B33-VI | 21,1 | 36 | 18 | 43 |
| B33-VII | 16,0 | 34 | 17 | 40 |
| B33-VIII | 17,1 | 34 | 17 | 45 |
| B33-IX | 6,8 | 30 | 16 | 40 |
| B33-X | 37,1 | 42 | 18 | 45 |
| B33-XI | 4,7 | 29 | 16 | 43 |
| B33-XII | 5,2 | 30 | 16 | 40 |
| B33-XIII | 6,3 | 30 | 16 | 40 |
| B33-XIV | 6,3 | 30 | 16 | 40 |
| B33-XV | 11,6 | 32 | 17 | 43 |
| B33-XVI | 6,3 | 30 | 16 | 40 |

Tabela 2. Parâmetros adotados para estimar σ_r (B61).

| Base | \bar{N}_{SPT} | ϕ' (°) | γ (kN/m ³) | q (kPa) |
|----------|-----------------|-------------|-------------------------------|-----------|
| B61-I | 16,8 | 34 | 17 | 40 |
| B61-II | 14,9 | 33 | 17 | 40 |
| B61-III | 26,2 | 38 | 18 | 40 |
| B61-IV | 14,1 | 33 | 17 | 40 |
| B61-V | 7,1 | 30 | 16 | 40 |
| B61-VI | 4,1 | 29 | 16 | 40 |
| B61-VII | 9,6 | 31 | 17 | 40 |
| B61-VIII | 6,4 | 30 | 16 | 40 |
| B61-IX | 16,2 | 34 | 17 | 40 |
| B61-X | 15,5 | 34 | 17 | 40 |
| B61-XI | 9,8 | 31 | 17 | 40 |
| B61-XII | 15,3 | 34 | 17 | 40 |
| B61-XIII | 16,0 | 34 | 17 | 40 |
| B61-XIV | 16,0 | 34 | 17 | 40 |
| B61-XV | 16,4 | 34 | 17 | 40 |
| B61-XVI | 14,1 | 33 | 17 | 40 |

Após a estimativa de σ_r usando os métodos de Terzaghi (1943), com as contribuições de Vesic (1975), e do AIJ (2001), as tensões admissíveis foram estimadas dividindo σ_r por um FS global de 3 para o método de Terzaghi (1943) e de 2 para o método do AIJ (2001), conforme recomendação da NBR 6122 (ABNT, 2019a) para os casos em que a capacidade de carga é estimada a partir de métodos teóricos e semiempíricos.

Diferente dos métodos de Terzaghi (1943), com as contribuições de Vesic (1975), e do AIJ (2001), o método de Teixeira (1996) estima diretamente a tensão admissível (σ_{adm}) do solo, em Mpa, a partir do \bar{N}_{SPT} através da Equação (6) (Cintra et al., 2011).

$$\sigma_{adm} = 0,05 + (1 + 0,4B)(\bar{N}_{SPT}/100) \quad (6)$$

A Equação (6) foi desenvolvida a partir da capacidade de carga estimada pelo método de Terzaghi (1943) em solos arenosos adotando um FS global igual a 3 (Teixeira, 1996). Com isso, a capacidade de carga foi estimada por retro análise multiplicado σ_{adm} pelo FS global de 3.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 3 e 4 apresentam a comparação entre os valores de capacidade de carga estimados pelos métodos de Terzaghi (1943), do AIJ (2001) e de Teixeira (1996) com os valores de capacidade de carga calculados a partir dos resultados dos ensaios de PCP para as regiões B33 e B61, respectivamente.

Em geral, os métodos de Terzaghi (1943) e AIJ (2001) estimaram valores de capacidade de carga do sistema solo-placa bem inferiores aos valores calculados a partir dos resultados dos ensaios de PCP, diferente do método de Teixeira (1996) que estimou os valores mais próximos dos calculados a partir dos resultados dos ensaios de PCP. Resultados similares foram observados nos estudos de Bezerra (1990), Oliveira e Amancio (2016), Araújo (2016), Souza (2018) e Alexandre (2021).

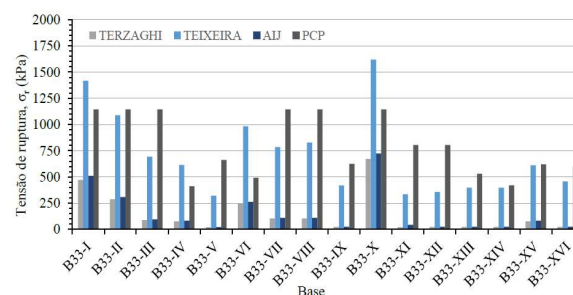


Figura 3. Valores de tensão de ruptura na região B33.

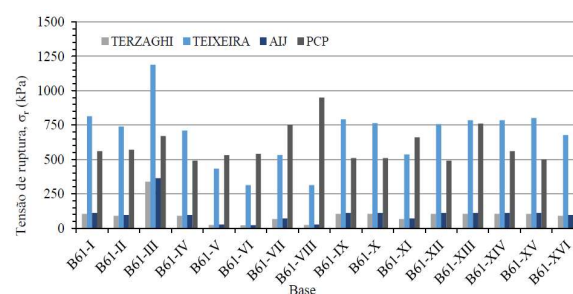


Figura 4. Valores de tensão de ruptura na região B61.

Os valores de capacidade de carga calculados a partir dos resultados dos ensaios de PCP estiveram entre 410 kPa e 1144 kPa para a região B33 e 490 kPa e 950 kPa para a região B61. O método Terzaghi (1943) estimou valores de tensão de ruptura entre 21 kPa e 672 kPa na região B33 e 21 kPa e 337 kPa na região B61. Faixas similares foram estimadas com o método AIJ (2001), que estimou valores entre 22 kPa e 724 kPa na região B33 e 22 kPa e 363 kPa na região B61. Por outro lado, o método de Teixeira (1996) estimou valores variando entre 321 kPa e 1618 kPa na região B33 e 313 kPa e 1118 na região B61.

As diferenças percentuais entre os valores de capacidade de carga do sistema solo-placa estimados pelos métodos em relação aos valores calculados a partir dos resultados dos ensaios de PCP também foram analisadas. Os valores de diferença percentual ($D_{\%}$) para σ_r foram calculados usando a Equação (7):

$$D_{\%} = (|V_{cal} - V_{est}|/V_{cal}) \times 100 \quad (7)$$

onde V_{cal} é o valor calculado a partir dos resultados dos ensaios de PCP e V_{est} é o valor estimado a partir

dos métodos de Terzaghi (1943), do AIJ (2001) e de Teixeira (1996).

Os valores de média, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) de $D_{\%}$ para σ_r são apresentados nas Tabelas 3 e 4 para as regiões B33 e B61, respectivamente.

Tabela 3. Valores de média, desvio padrão e coeficiente de variação de $D_{\%}$ para σ_r na região B33.

| Parâmetro | Terzaghi (1943) | AIJ (2001) | Teixeira (1996) |
|-----------|-----------------|------------|-----------------|
| Média | 84% | 82% | 36% |
| DP | 18% | 19% | 25% |
| CV | 22% | 23% | 69% |

Tabela 4. Valores de média, desvio padrão e coeficiente de variação de $D_{\%}$ para σ_r na região B61.

| Parâmetro | Terzaghi (1943) | AIJ (2001) | Teixeira (1996) |
|-----------|-----------------|------------|-----------------|
| Média | 84% | 82% | 42% |
| DP | 11% | 12% | 19% |
| CV | 13% | 14% | 46% |

Os valores de média, DP e CV de $D_{\%}$ para o método de Terzaghi (1943) foram, respectivamente, 84%, 18% e 22%, para a região B33 e 84%, 11% e 13%, respectivamente, para a região B61 e foram muito próximos aos valores de média, DP e CV de $D_{\%}$ para o método do AIJ (2001), que foram, respectivamente, 82%, 19% e 23%, para a região B33 e 82%, 12% e 14%, respectivamente, para a região B61. Por outro lado, os valores de média, DP e CV de $D_{\%}$ para o método de Teixeira (1996) divergiram significativamente dos calculados para os métodos de Terzaghi (1943) e do AIJ (2001), com valores de média, DP e CV de $D_{\%}$ igual a 36%, 25% e 69%, respectivamente, para a região B33 e igual a 42%, 19% e 46%, respectivamente, para a região B61.

As Figuras 5 e 6 apresentam a comparação entre os valores de tensão admissível estimados pelos métodos de Terzaghi (1943), do AIJ (2001) e de Teixeira (1996) com os valores de tensão admissível calculados a partir dos resultados dos ensaios de PCP para as regiões B33 e B61, respectivamente. Semelhante ao observado para a capacidade de carga (Figuras 3 e 4), os métodos de Terzaghi (1943) e AIJ (2001) subestimaram os valores de tensão admissível do sistema solo-placa quando comparados aos valores calculados a partir dos resultados dos ensaios de PCP. Por outro lado, o método de Teixeira (1996) estimou valores de tensão admissível mais próximos aos valores provenientes dos resultados dos ensaios de PCP. Resultados similares foram observados nos

estudos de Oliveira e Amancio (2016) e Araújo (2016).

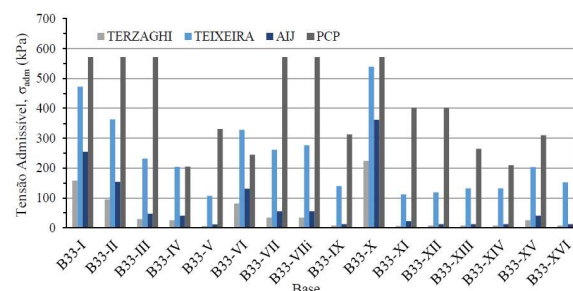


Figura 5. Valores de tensão admissível na região B33.

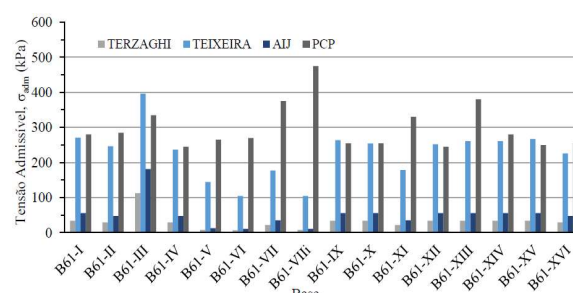


Figura 6. Valores de tensão admissível na região B61.

Os valores de $D_{\%}$ para σ_{adm} também foram calculados usando a Equação (7) e os valores de média, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) de $D_{\%}$ para σ_{adm} são apresentados nas Tabelas 5 e 6 para as regiões B33 e B61, respectivamente.

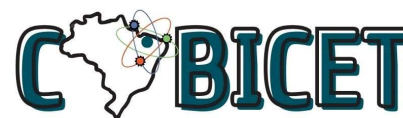
Tabela 5. Valores de média, desvio padrão e coeficiente de variação de $D_{\%}$ para σ_{adm} na região B33.

| Parâmetro | Terzaghi (1943) | AIJ (2001) | Teixeira (1996) |
|-----------|-----------------|------------|-----------------|
| Média | 89% | 82% | 43% |
| DP | 12% | 19% | 22% |
| CV | 14% | 23% | 50% |

Tabela 6. Valores de média, desvio padrão e coeficiente de variação de $D_{\%}$ para σ_{adm} na região B61.

| Parâmetro | Terzaghi (1943) | AIJ (2001) | Teixeira (1996) |
|-----------|-----------------|------------|-----------------|
| Média | 89% | 82% | 24% |
| DP | 7% | 12% | 25% |
| CV | 8% | 12% | 104% |

Os valores de média, DP e CV de $D_{\%}$ para o método de Terzaghi (1943) foram, respectivamente, 89%, 12% e 14%, para a região B33 e 89%, 7% e 8%, respectivamente, para a região B61. Para o método



do AIJ (2001), os valores de média, DP e CV de $D_{\%}$ foram, respectivamente, 82%, 19% e 23%, para a região B33 e 82%, 12% e 12%, respectivamente, para a região B61. Por outro lado, os valores de média, DP e CV de $D_{\%}$ para o método de Teixeira (1996) divergiram significativamente dos calculados para os métodos de Terzaghi (1943) e do AIJ (2001), com valores de média, DP e CV de $D_{\%}$ igual a 43%, 22% e 50%, respectivamente, para a região B33 e igual a 24%, 25% e 104%, respectivamente, para a região B61.

Os resultados mostraram que a estimativa da capacidade de carga e da tensão admissível a partir do método de Teixeira (1996) apresentou os valores mais próximos aos valores calculados a partir dos resultados dos ensaios de PCP, com os menores valores de média de $D_{\%}$ em comparação aos métodos de Terzaghi (1943) e do AIJ (2001). Todavia, o método de Teixeira (1996) resultou nos maiores valores de CV para $D_{\%}$ quando comparados aos valores dos métodos de Terzaghi (1943) e do AIJ (2001), destacando a variabilidade que o método de Teixeira (1996) pode apresentar na estimativa de capacidade de carga e tensão admissível do sistema solo-fundação.

A elevada variabilidade de $D_{\%}$ observada no método de Teixeira (1996), quando comparado a variabilidade de $D_{\%}$ observada nos métodos de Terzaghi (1943) e do AIJ (2001), pode estar associada à dependência direta dos valores de σ_{adm} , e consequentemente σ_r , aos valores de \bar{N}_{SPT} , que apresentaram uma elevada dispersão (Tabelas 1 e 2). Por outro lado, os valores de σ_r , e consequentemente σ_{adm} , estimados a partir dos métodos de Terzaghi (1943) e do AIJ (2001) utilizam parâmetros que são definidos a partir de valores de ϕ' , que foram mais homogêneos (Tabelas 1 e 2).

CONCLUSÃO

Este artigo apresentou a comparação dos valores de capacidade de carga e tensão admissível estimados a partir do método teórico de Terzaghi (1943) e dos métodos semiempíricos de Teixeira (1996) e do AIJ (2001) com valores calculados a partir dos resultados de ensaios de PCP em um solo arenoso localizado no estado do Rio Grande do Norte. Para isso, um banco de dados composto dos resultados de 32 sondagens à percussão com medida de N_{SPT} e de 32 ensaios de prova de carga realizados em uma placa rígida metálica de 80 cm de diâmetro.

Os valores de capacidade de carga e tensão admissível estimados a partir dos métodos de Terzaghi (1943) e do AIJ (2001) foram bem inferiores aos valores calculados a partir dos resultados dos ensaios de PCP, demonstrando serem métodos muito conservadores. Os valores estimados

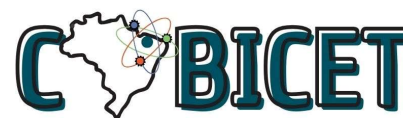
apresentaram uma diferença percentual média entre 80% e 90% quando comparados aos valores calculados.

A estimativa da capacidade de carga e da tensão admissível a partir do método de Teixeira (1996) apresentou os valores mais próximos aos valores calculados a partir dos resultados dos ensaios de PCP, com os menores valores de média para diferença percentual em relação aos métodos de Terzaghi (1943) e do AIJ (2001).

A variabilidade dos valores de diferença percentual observada no método de Teixeira (1996) foi significativamente superior àquela observada nos métodos de Terzaghi (1943) e do AIJ (2001) e pode estar associada à dependência direta aos valores de \bar{N}_{SPT} , que apresentaram elevada dispersão.

REFERÊNCIAS

- Alexandre, A. R. P. Métodos para obtenção da tensão admissível em fundações superficiais – estudo comparativo. 2021. 53 f. Monografia (Curso de Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2021.
- Architectural Institute of Japan (AIJ). Recommendations for design of building foundations. AIJ, Tokyo, 2001.
- Araújo, D. A. M. Efeito da dimensão da placa em resultados de prova de carga em areia. 2016, 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 6122: projeto e execução de fundações. ABNT, Rio de Janeiro, 2019a.
- ABNT. NBR 6489: prova de carga estática em fundação direta. ABNT, Rio de Janeiro, 2019b.
- Bezerra, S. P. Estudo comparativo entre o SPT, a prova de carga sobre placas e o ensaio pressiométrico, aplicado a fundações superficiais em solo arenoso – resultados preliminares. 1990. 240 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1990.
- Cintra, J. C. A.; Aoki, N.; Albiero, J. H. Fundações diretas: projeto geotécnico. Oficina de Textos, São Paulo, 2011.
- Cintra, J. C. A.; Aoki, N.; Tsuha, C. H. C.; Giacheti, H. L. Fundações: ensaios estáticos e dinâmicos. Oficina de Textos, São Paulo, 2013.
- Cudmani, R. O. Estudo do comportamento de fundações superficiais assentes em solos parcialmente saturados através de ensaios de



- placa. 1994, 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.
- Du, N. L.; Ohtsuka, S.; Hoshina, T.; Isobe, K. Discussion on size effect of footing in ultimate bearing capacity of sandy soil using rigid plastic finite element method. *Soils and Foundations*, v. 56, p. 93-103, 2016.
- Duarte, L. N. Análise de prova de carga instrumentada em uma sapata rígida. 2006, 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.
- Godoy, N. S. Estimativa da capacidade de carga de estacas a partir de resultados de penetrômetro estático. Palestra técnica à Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 1983.
- Godoy, N. S. Fundações: Notas de Aula, Curso de Graduação. São Carlos (SP): Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 1972.
- Gomes, J. K. P.; Araújo, C. B. C.; Ayres, T. M. C. Análise da capacidade de carga de fundações superficiais por diferentes metodologias. RCT – Revista de Ciencia e Tecnologia, v. 6, 2020.
- Marchetti, S. A New in situ Test for the Measurement of Horizontal Soil Deformability. In: ASCE Speciality Conference on in Situ Measurement of Soil Properties, Raleigh. Proceedings... Raleigh: ASCE, 1975. v.2, p. 299-321, 1980.
- Medeiros, P. M. Avaliação da previsão do comportamento geotécnico de fundações superficiais assentes em subsolos arenosos de baixa compactação em Fortaleza a partir de ensaios de placa. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.
- Ménard, L. Travail personnel sur le pressiomètre. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1955.
- Ménard, L. Calcul de la force portante des foundations sur la base des resultants des essays pressiométriques. *Sols Soils*, v. 5, p. 9-32, 1963.
- Meyerhof, G.G. Some recent research on the bearing capacity of foundations. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 1, p. 16-26, 1963.
- Meyerhof, G. G. The ultimate Bearing Capacity of Foundations. *Geotechnique*, v. 2, p. 301-331, 1951.
- Noguchi, L. T. Análise da capacidade de carga de fundação por sapatas executadas na cidade de São Caetano do Sul/SP. 2012, 184 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.
- Oliveira, B. L. M.; Amancio, L. B. Otimização do cálculo da capacidade de carga e tensão admissível do solo para sapatas isoladas. *Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, v. 12, p. 53-66, 2016.
- Ruver, C. A. Determinação do comportamento carga-recalque de sapatas em solos residuais a partir de ensaios SPT. 2005, 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- Schnaid, F.; Odebrecht, E. Ensaios de campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações. Oficina de Textos, São Paulo, 2012.
- Skempton, A. W. The bearing capacity of clays. In: Building research congress, 1951, London. Proceedings... London: Building Research Congress, 1951. p. 180-189.
- Soares Júnior, D. A. Estudo da capacidade de carga e recalques em um solo residual de gnaiss através de ensaios de campo e laboratório. 2003, 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.
- Souza, M. W. F. Estudo da variação da tensão admissível com a dimensão de sapatas apoiadas em subsolos arenosos. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.
- Teixeira, A. H. Projeto e execução de fundações. In: Seminario de Engenharia de Fundacoes Especiais e Geotecnia, São Paulo. Anais... São Paulo, 1996. v. 1. p. 33-50.
- Teixeira, A. H.; Godoy, N. S. Análises, projeto e execução de fundações rasas. Hachich, W. et al. (Eds.). *Fundações: teoria e prática*. Pini, São Paulo, 1998.
- Terzaghi, K. Theoretical soil mechanics. John Wiley & Sons, New York, 1943.
- Terzaghi, K.; Peck, R. B. Soil mechanics in engineering practice. John Wiley & Sons, New York, 1948.
- Van der Veen, C. The bearing capacity of a pile. In: The Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Zurich. Proceedings... Zurich: ISSMGE, 1953, p. 84-90.
- Vesic, A. S. Bearing capacity of shallow foundations. Winterkorn, H. F.; Fang, H. Y. (Eds.). *Foundation engineering handbook*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1975.