

Estudo da Extrapolação do Coeficiente de Reação em Solos Arenosos para Fundações a Partir de Provas de Carga em Placa

Marcos Fábio Porto de Aguiar

Universidade de Fortaleza / Instituto Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, marcosfpa@hotmail.com

Francisco Heber Lacerda de Oliveira

Universidade de Fortaleza, Fortaleza, Brasil, heberoliveiracivil@hotmail.com

Yago Machado Pereira de Matos

Universidade de Fortaleza, Fortaleza, Brasil, yago_mpm@hotmail.com

Fernando Feitosa Monteiro

Universidade de Fortaleza, Fortaleza, Brasil, fernandofm91@hotmail.com

RESUMO: O presente trabalho trata da análise comparativa de métodos de determinação do coeficiente de reação do subsolo para fundações superficiais de grandes dimensões por meio de provas de carga. O coeficiente de reação do subsolo, também denominado pelos projetistas estruturais de coeficiente de mola, é a relação entre a intensidade média da tensão na superfície de contato da fundação com o solo e o deslocamento correspondente na fase elástica. Por meio de resultados de provas de carga com aplicação de pressões até 0,5 MPa, com placas de 0,45m e 0,80m de diâmetro, este coeficiente foi estimado para fundações, extrapolando-se os valores obtidos. Resultados de sondagens à percussão (tipo SPT) foram empregados para caracterização da estratigrafia do terreno, os quais foram realizados em solos identificados como arenosos. As extrapolações foram realizadas de acordo com Terzaghi (1955) e o método de Cintra (2005). Identificou-se grande discrepância entre os valores obtidos, confirmando-se, assim, a afirmativa de Cintra (2005) sobre a ineficiência da equação de Terzaghi (1955) para o caso em estudo.

PALAVRAS-CHAVE: Fundações Superficiais, Prova de Carga, Coeficiente de Reação do Subsolo.

1 INTRODUÇÃO

A hipótese simplificadora, utilizada há décadas, de que as fundações estão apoiadas sobre vínculos indeformáveis apresentava uma análise limitada da estrutura, causando certo desconforto por parte dos engenheiros, os quais necessitavam confiar que a estrutura projetada responderia de acordo com suas estimativas. Apesar de simplista, essa hipótese possibilitou importantes avanços, já que, no passado, se a deformabilidade do solo fosse levada em conta para o dimensionamento de fundações, uma quantidade enorme de cálculos seriam exigidos, impossibilitando de serem conduzidos manualmente. Ainda que com a popularização e o desenvolvimento do cálculo de estruturas por meio de métodos numéricos em

microcomputadores, percebe-se que muitos projetistas de estruturas buscam seguir a hipótese simplista do solo rígido, a qual pode conduzir a resultados muito distintos da realidade física. Por esse motivo, a condução de uma análise mais próxima da realidade física, levando em conta a deformabilidade do solo, deveria ser realizada mediante a parceria dos engenheiros de estruturas e de fundações (SOUZA e REIS, 2008).

Os Métodos Discretos, recursos muito utilizados na análise da interação solo-estrutura, procuram representar o solo ou o elemento estrutural como um conjunto de elementos isolados, portanto, não contínuo (VELLOSO et al., 1998). Os métodos baseados na hipótese de Winkler consideram que o solo é representado por um grupo de molas e, conforme Teixeira e

Godoy (1998), as tensões aplicadas na superfície horizontal do solo podem ser calculadas por meio de equações da Teoria da Elasticidade, onde se admite a existência de uma relação constante entre essas tensões e suas deformações subseqüentes, além de considerar que o meio é homogêneo, características constantes de ponto a ponto, e isotrópico, propriedades não se modificam independentemente da direção considerada.

2 DEFORMABILIDADE DE FUNDAÇÕES SUPERFICIAIS

2.1 Prova de carga em placa

Além de métodos analíticos e teóricos para determinação de parâmetros relativos ao comportamento tensão x deformação dos solos devido às solicitações, pode-se utilizar, também, o método experimental por meio de prova de carga em placa. Esse ensaio de campo pode ser realizado na superfície ou em profundidade e consiste em um sistema de reação que, devidamente adequado à aplicação das cargas, permite o apoio do macaco hidráulico durante a execução do carregamento (MORAES, 2005). Usualmente, na prova de carga sobre placa, é usada uma cargueira, que pode ser um caixão de areia ou brita ou ainda uma peça de concreto armado com dimensões adequadas ao carregamento necessário (Figura 01).

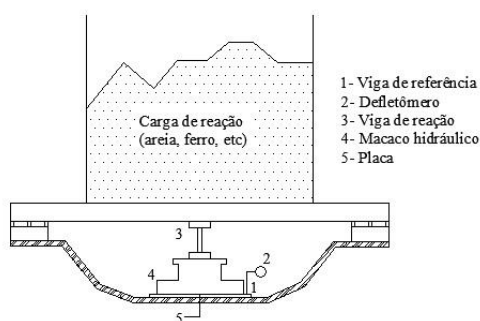


Figura 01: Reação com cargueira (Niyama et al., 1998).

Conforme Bowles (1996), devido à intensidade do carregamento a ser imposto no ensaio, torna-se mais conveniente a utilização desse método em placas de pequenas dimensões

e, mesmo fazendo uso destas, não é fácil a obtenção da deformação, pois a placa tende a ser menos rígida, dificultando a determinação da constante de deflexão através dela.

No Brasil, o referido ensaio, seguindo ABNT (1984) e DNIT (2004), deve ser realizado com placa de diâmetro equivalente a 80 cm. O ensaio tem por objetivo a determinação da curva tensão x deslocamento na cota de assentamento da fundação. Daí, com a devida interpretação, podem ser obtidas informações sobre capacidade de carga, tensão admissível, recalque e coeficiente de reação para fundações superficiais (MORAES, 2005).

2.2 Capacidade de carga de fundação direta

A capacidade de carga (σ_r) para o sistema fundação-solo representa a mobilização da resistência máxima na iminência de ruptura e pode ser obtida por procedimentos teóricos e, experimentalmente, pela prova de carga em placa (CINTRA et al., 2011). Na Figura 02, apresenta-se uma curva típica tensão (σ) por deslocamento (ρ) com identificação da capacidade de carga (σ_r).

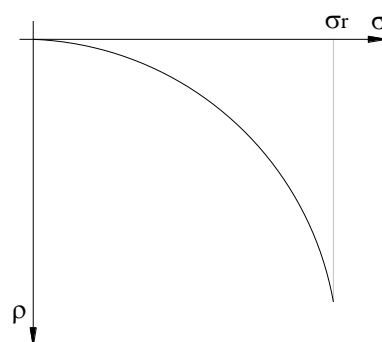


Figura 02: Curva típica tensão x deslocamento de ensaio de prova de carga.

2.3 Tensão admissível

O valor considerado em projeto, denominado tensão admissível (σ_{adm}), deve atender, com coeficientes de segurança predeterminados, aos estados-limites últimos (ruptura), e de serviço (recalques e vibrações). A partir da identificação da capacidade de carga, então, é possível determinar a tensão admissível. Métodos teóricos, semi-empíricos, experimentais e provas de carga podem ser

empregados. Conforme recomenda a ABNT (2010), os resultados devem ser interpretados de modo a considerar a relação modelo-protótipo (efeito de escala), bem como as camadas de solo influenciadas.

2.4 Recalque

De acordo com Aoki (2000), o desempenho de uma obra de engenharia civil, ao longo de sua vida útil, especialmente da sua fundação, depende do grau de alteração do maciço do solo durante a fase de execução desta última. Segundo Reis (2000), a compressibilidade dos solos, em função do tempo, aparece no fenômeno da interação estrutura-solo como principal agente de desequilíbrio, pois a maneira como os recalques evoluem e se estabilizam determina a importância ou a gravidade dos danos causados por esses recalques à superestrutura. Assim, considerando os valores de referência de deslocamentos verticais de serviço em fundações superficiais, os recalques podem ser estimados partindo de tensões admissíveis obtidas por procedimentos teóricos ou semiempíricos e emprego de métodos analíticos. Para o caso de utilização de provas de carga, pode-se verificar, para a tensão admissível adquirida do ensaio, o recalque extrapolado da placa para o elemento de fundação (CINTRA et al., 2011). A Figura 03 mostra o recalque admissível na curva tensão x deslocamento.

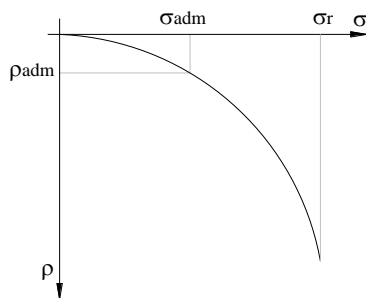


Figura 03: Recalque admissível na placa.

2.5 Coeficiente de reação do solo

De acordo com Terzaghi e Peck (1976), o coeficiente de reação do solo (k) é a relação entre a intensidade média da tensão na

superfície de contato da fundação com o solo e o deslocamento correspondente na fase elástica. Esse coeficiente depende das propriedades do solo, das dimensões e do formato da estrutura solicitante, podendo ser obtido por meio de cálculo de recalque da fundação real, uso de tabelas de valores típicos ou ensaio de placa. Utilizando-se o ensaio de placa, após o desenvolvimento da curva tensão x deslocamento, pode-se ajustar a fase inicial dessa curva por uma reta e se obter o coeficiente de reação do solo (k), também denominado coeficiente de recalque, coeficiente de Winkler, coeficiente de Westergaard, coeficiente de “balasto” e coeficiente de mola. De acordo com a Figura 04, o coeficiente de reação é definido como segue (CINTRA et al., 2011):

$$k = \frac{\sigma_p}{\rho_p} \text{ (Pa/m)} \quad (1)$$

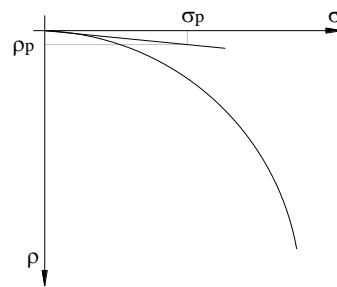


Figura 04: Definição do coeficiente de reação a partir da curva tensão x deslocamento.

2.6 Interpretações de resultados do ensaio de placa

A partir de resultados de prova de carga, pode-se estimar a capacidade de carga, a tensão admissível, o recalque admissível e o coeficiente de reação. Porém, a interpretação não é simples e exige atenção acerca de diversos aspectos relativos à placa, à fundação e ao meio físico (subsolo). A variação de dimensão da área de aplicação da carga influencia, diretamente, nos resultados e interpretações. A maior ou menor variação depende do meio físico ou da estratigrafia do subsolo.

Existem, como mostra a Figura 05, diversas hipóteses considerando meios diferentes e que

podem não representar, em qualquer caso, a situação real. A Figura 05a mostra curvas relativas a uma placa e a uma sapata, representado as dimensões diferentes, em argila sobreadensada e em meio elástico homogêneo (CINTRA et al., 2011). Nesse caso, capacidade de carga e tensão admissível seriam iguais, porém recalque admissível e coeficiente de reação seriam diferentes (efeito de dimensão).

Identifica-se, na Figura 05b, curvas típicas de placa e sapata (dimensões diferentes) em areias em que, na interpretação, indicariam capacidade de carga, tensão admissível, recalque admissível e coeficiente de reação diferentes (CINTRA et al., 2011).

Para o caso particular, considerando os módulos de deformabilidade das camadas crescendo com a profundidade, denominado meio de Gibson (1967), $E_s = Kz$, são verificados capacidade de carga, tensão admissível e recalque admissível diferentes com coeficiente de reação igual, comparando-se as curvas da placa e da sapata, de acordo com a Figura 05c (CINTRA et al., 2011). Nos casos das Figuras 05b e 05c, identifica-se efeito de escala, considerando que a adimensionalização do eixo não gera curva única.

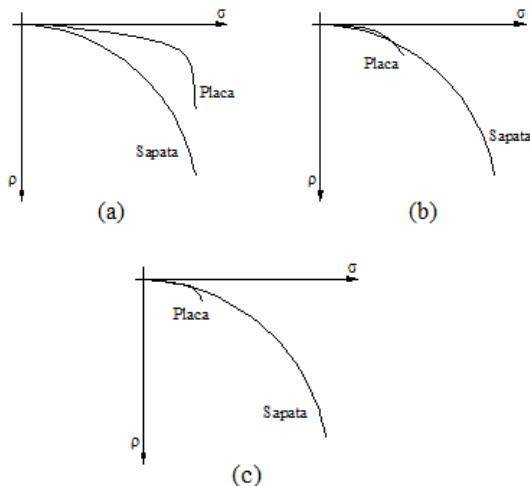


Figura 05: Provas de carga em placa e sapata: (a) argila sobreadensada no meio elástico homogêneo; (b) curvas tensão x deslocamento típicas em areia; (c) caso particular em areia, $E_s = Kz$.

2.7 Extrapolação do coeficiente de reação vertical em solo arenoso

Uma forma de extrapolação do coeficiente de reação do solo de uma sapata quadrada, a partir de uma placa de mesmo formato, foi proposta por Terzaghi (1955) para solos arenosos, onde:

$$k = k_1 \left[\frac{B + B_1^2}{2B} \right] \quad (2)$$

Onde B é o lado da sapata, B_1 é o lado da placa quadrada, no caso de placas circulares, pode-se transformar a área circular em uma área quadrada, k_1 e k são os coeficientes de reação vertical da placa e da sapata respectivamente.

Outra forma de extrapolação desse coeficiente em solo arenoso é a solução de Cintra et al. (2005), cuja metodologia considera, para sapatas quadradas apoiadas à superfície, a areia como meio linearmente não homogêneo, apresentando uma relação entre a profundidade (z) e o módulo de deformabilidade (E_s), expressa por:

$$E_s = E_0 + Kz \quad (3)$$

Com a estimativa de E_0 e K , é possível, pelas relações E_0/K e B_f/B_p (relação entre as dimensões da fundação e da placa), determinar o valor de β como indica a Figura 06.

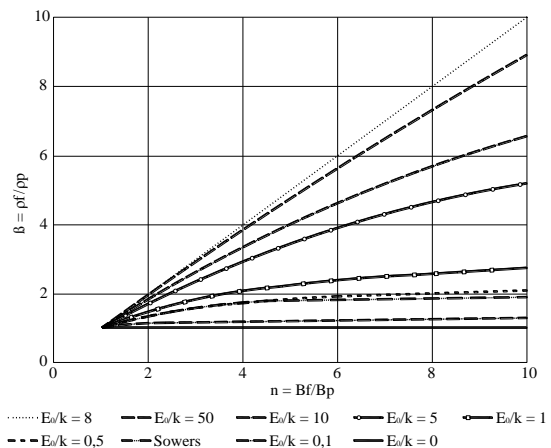


Figura 06: Extrapolação do recalque da placa para sapatas quadradas à superfície, para diversas relações E_0/K (m) (Cintra et al., 2005).

A partir do valor obtido para β , pode-se extrapolar o valor do coeficiente de reação da placa para a sapata, utilizando a equação estabelecida por (CINTRA et al., 2011):

$$k_{sapata} = \frac{1}{\beta} k_{placa} \quad (4)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente estudo, além de analisar os resultados obtidos pela sondagem à percussão tipo SPT (Standard Penetration Test), conforme Figuras 07 e 08, apresenta valores de ensaios de prova de carga realizados em subsolo arenoso (pontos 1 e 2) situados no litoral da região nordeste do Brasil, de acordo com as Figuras 09, 10, 11 e 12.

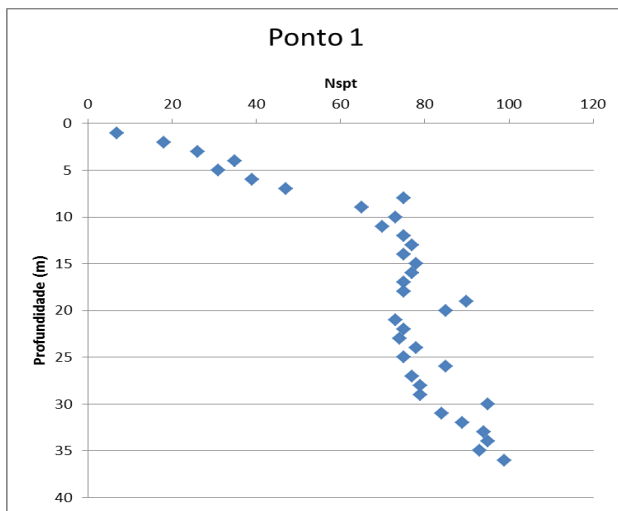


Figura 07: Perfil do ensaio de SPT no ponto 1.

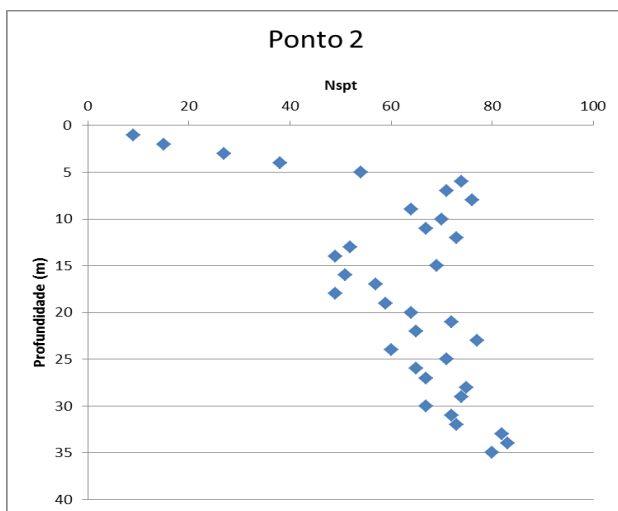


Figura 08: Perfil do ensaio de SPT no ponto 2.

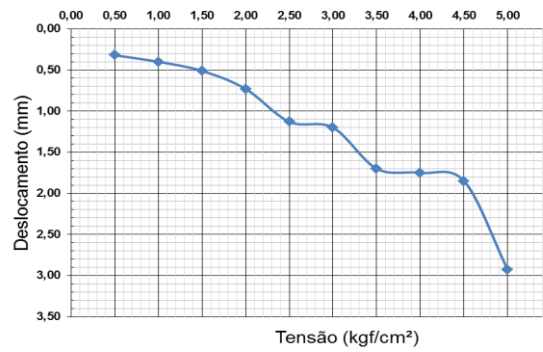


Figura 09: Curva tensão x deslocamento no ponto 1 para placa de 45 cm.

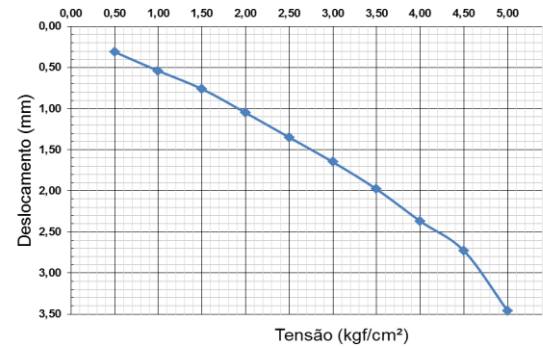


Figura 10: Curva tensão x deslocamento no ponto 1 para placa de 80 cm.

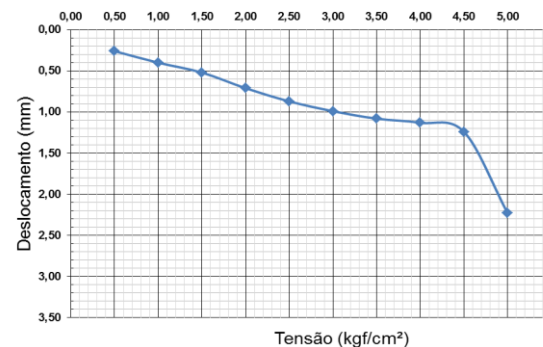


Figura 11: Curva tensão x deslocamento no ponto 2 para placa de 45 cm.

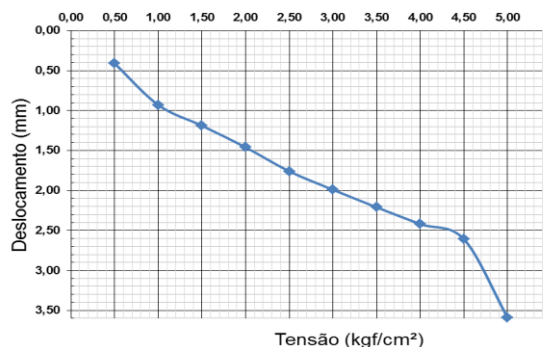


Figura 12: Curva tensão x deslocamento no ponto 2 para placa de 80 cm.

Antes da aplicação dos métodos, foi necessária a transformação do formato circular da fundação hipotética e da placa, com

diâmetros de 16,50 m e 0,80 m, para áreas quadradas equivalentes, obtendo-se 14,62m e 0,71m, respectivamente. Os valores dos recalques nos dois pontos foram estabelecidos para uma tensão de 196,2 kPa. Utilizando-se a formulação de Terzaghi (1955), foram consideradas, para ao referido carregamento, as áreas equivalentes e o coeficiente de reação da placa.

Para a solução de Cintra et al. (2005), foi definida a equação da reta ajustada que relaciona o módulo de deformabilidade (E), estimado a partir de N_{SPT} , e a profundidade (z), de acordo com a Tabela 02. A relação $E \times N_{SPT}$ varia de acordo com o tipo de solo, conforme indica a Tabela 03.

Tabela 01: Valores de E_0 , K e E_0/K nos pontos 1 e 2.

Parâmetro	Ponto 1	Ponto 2
$E_0(N/m^2)$	0,715	0,772
K	0,0141	0,0082
E_0/K	51	94

Tabela 02: Relação entre o índice de resistência à penetração, o módulo de elasticidade do solo e a estratigrafia do terreno.

E (MPa)	
Areia	$3*0,9*N_{SPT}$
Areia Siltosa	$3*0,7*N_{SPT}$
Argila	$7*0,2*N_{SPT}$

Dessa forma, a estimativa de E_0 , de K e, portanto, da relação E_0/K possibilitou a extrapolação do coeficiente de reação da placa para a sapata conforme Cintra et al. (2005). A Tabela 04 apresenta os valores dos coeficientes de reação do solo obtidos pelos métodos de Terzaghi (1955) e de Cintra et al. (2005) além dos adquiridos pelas provas de carga em placas de 45 e 80 cm.

Tabela 03: Valores dos coeficientes de reação do solo para Cintra (2005), Terzaghi (1955) e placas de 45 e 80 cm nos pontos 1 e 2.

Coeficiente de Reação Vertical do Solo (N/m ³)				
Ponto	Cintra	Terzaghi	Placa 45cm	Placa 80cm
1	1,36E+07	6,79E+07	4,41E+08	2,47E+08
2	9,82E+06	4,89E+07	3,92E+08	1,78E+08

Verifica-se uma relação (d_{80}/d_{45}) entre os diâmetros das placas de 80cm e 45cm equivalente a 1,78 e uma relação de 20,63 entre uma fundação circular hipotética de 16,5m de diâmetro e a placa de 80cm (d_{1650}/d_{80}). Considerando a tendência observada entre placas de diâmetros diferentes e extrapolando-se este comportamento, pode-se considerar aceitável uma relação inversa para o comportamento do coeficiente de reação. A Tabela 05 apresenta relações entre coeficiente de reação da placa e coeficiente de reação da fundação extrapolado (k_p/k_f) para cada método, assim a relação entre os valores obtidos das provas de carga para placas de diâmetros diferentes.

Tabela 04: Relação entre os valores dos coeficientes de reação do solo obtidos por Cintra (2005), Terzaghi (1955) e para as placas de 45 e 80 cm.

Ponto	$k_{p80}/k_{fTerzaghi}$	$k_{p80}/k_{fCintra}$	k_{p45}/k_{p80}
1	3,64	18,12	1,79
2	3,64	18,12	2,20

A partir dos resultados, entende-se como razoável que, se uma relação entre os coeficientes de reação de placas, obtidos por meio de provas de carga, mostra-se próxima do inverso da relação de seus diâmetros, a extrapolação, partindo de um valor de prova de carga para a fundação, deve, possivelmente, seguir esta lógica para um mesmo subsolo. Tendo isto, a proposta de Cintra et al. (2005) se apresentou bem mais próxima da relação inversa dos diâmetros da fundação e da placa (d_f/d_p).

4 CONCLUSÃO

Por meio deste trabalho, foi possível verificar a discrepância entre os coeficientes de reação do solo obtidos pelas hipóteses de Terzaghi (1955) e Cintra et al. (2005). Tendo em vista os valores de coeficiente de reação em provas de carga, comparados entre as placas de diâmetros 45cm e 80cm, observa-se uma relação inversa entre a variação do diâmetro da placa e a variação de coeficiente de reação. Esta variação aproxima-

se dos valores obtidos, pela proposta de Cintra et al. (2005), no caso de extrapolação para uma fundação de grande dimensão, partindo do coeficiente de recalque medido em prova de carga com placa de 80cm de diâmetro. Observa-se, então que, considerando fundações superficiais de grande dimensão em subsolo arenoso, a equação de Terzaghi (1955) não comprova bons resultados na extrapolação do coeficiente de recalque a partir de provas de carga, enquanto que a proposta de Cintra et al. (2005) mostrou boa aproximação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) e à Berater Tecnologia em Solos e Fundações pelo fornecimento dos dados.

REFERÊNCIAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984), NBR 6489:1984. *Prova de carga direta sobre terreno de fundação*.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010), NBR 6122:2010, *Projeto e execução de fundações*.
- Aoki, N. (2000). *Reflexões sobre o comportamento de sistema isolado de fundação*. In: SEFE IV, São Carlos.
- Bowles, J.E. (1996), *Foundation analysis and design*, McGraw-Hill International Editions, p. 501-506.
- DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2004), ME 055:2004. *Pavimento rígido - prova de carga estática para determinação do coeficiente de recalque de subleito e sub-base em projeto e avaliação de pavimentos*.
- Cintra, J. C., Aoki, N., Albiero, J. H. (2005). *Extrapolação de recalques de placas para sapatas em areia*. Solos e Rochas, Nº 28, Vol. 3.
- Cintra, J. C., Aoki, N., Albiero, J. H. (2011). *Fundações diretas - projeto geotécnico*, São Paulo-SP, Editora Oficina de Textos.
- Gibson, R. E. (1967). *Some results concerning displacements and stresses in a non-homogeneous elastic half-space*, Geotechnique, Nº 17, Vol. 1.
- Moraes, L. (2005). *Prova de carga dinâmica em placa*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos: USP.
- Niyama, S.; Aoki, N.; Chamecki, P. R. (1998), *Verificação de desempenho*. In: HACHICH, W. et al. *Fundações: teoria e prática*. São Paulo: Pini, 1998. p. 723-751.
- Reis, J. H. C. (2000). *Interação solo-estrutura de grupo de edifícios com fundações superficiais em argila mole*. São Carlos, 148p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Souza, R. A., Reis, J. H. C. (2008). *Interação solo-estrutura para edifícios sobre fundações rasas*. Maringá, 11p. – Departamento de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Estadual de Maringá.
- Teixeira, A. H., Godoy, N. S. (1998). *Análise, projeto e execução de fundações rasas*. In: HACHICH, W. et al., *Fundações: teoria e prática*. São Paulo: Pini, p. 227-264.
- Terzaghi, K. (1955). *Evaluation of coefficients of subgrade reaction*. Geotechnique, Nº 4, Vol. 5.
- Terzaghi, K. e Peck, R. B. (1976). *Mecânica de suelos en la ingeniería practica*, Editora “El Anteneo” S.A. autorizado por John Wiley & Sons, Barcelona-España.
- Velloso, D. A., Maria, P. E. L. S., Lopes, F. R (1998). *Princípios e modelos básicos de análise*. In: Hachichi, W. et al., *Fundações: teoria e prática*. São Paulo: Pini, p. 163-196.