
Assessment of settlement prediction by theoretical and semi-empirical methods in a granular soil profile in the Brazilian Northeast

Avaliação da previsão de recalques por métodos teóricos e semi-empíricos em perfil de solo granular do Nordeste Brasileiro

Received: 08-07-2024 | Accepted: 10-08-2024 | Published: 14-08-2024

Matheus Vasconcelos do Nascimento

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7060-4440>

Universidade Federal do Ceará, Brasil

E-mail: matheusvasna@gmail.com

Ana Carolina Vasconcelos Silva

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4264-2076>

Universidade Federal do Ceará, Brasil

E-mail: eng.anacarolinasvasconcelos@gmail.com

Rodolfo Moreira Cavalcante

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5355-8719>

Universidade Federal do Ceará, Brasil

E-mail: rodolfocavalcante@gmail.com

Alfran Sampaio Moura

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0303-2484>

Universidade Federal do Ceará, Brasil

E-mail: alfransampaio@ufc.br

ABSTRACT

The direct study investigates settlements from a circular load test with a diameter of 50 cm, conducted at the Experimental Field of Geotechnics and Foundations of the Federal University of Ceará. The study utilizes data from laboratory and field tests to determine parameters, employing both the classical methodology of Elasticity Theory and semi-empirical methods such as those by Décourt (1992), Schmertmann (1978), Barata (1984), Burland & Burbidge (1985), Meyerhof (1965), and Sandroni (1991). Laboratory tests included physical characterization, direct shear tests, triaxial tests, and Standard Penetration Tests (SPT). The direct load test conducted according to NBR 6489/19 standard served as a reference for comparing calculation methods. Comparative analysis using the least squares method indicates that the methods of Schmertmann (1978) and Sandroni (1991) yielded results closer to the direct load test, whereas the methods of Burland & Burbidge (1985), Barata (1984), and Meyerhof (1965) showed greater variation

Keywords: Load test; Settlement; Estimation.

RESUMO

O estudo investiga previsões de recalques de uma prova de carga direta circular com 50 cm de diâmetro, realizada no Campo Experimental de Geotecnia e Fundações da Universidade Federal do Ceará. O trabalho utiliza dados de ensaios de laboratório e de campo para determinação de parâmetros, empregando tanto a metodologia clássica da Teoria da Elasticidade quanto métodos semi-empíricos como os de Décourt (1992), Schmertmann (1978), Barata (1984), Burland & Burbidge (1985), Meyerhof (1965) e Sandroni (1991). Os ensaios de laboratório incluíram caracterização física, cisalhamento direto e ensaios triaxiais, além de sondagem a percussão (SPT). A prova de carga direta realizada conforme a norma NBR 6489/19 serviu como referência para comparação entre os métodos de cálculo. A análise comparativa, utilizando o método dos mínimos quadrados, indica que os métodos de Schmertmann (1978) e Sandroni (1991) apresentaram resultados mais próximos da prova de carga direta, enquanto os métodos de Burland & Burbidge (1985), Barata (1984) e Meyerhof (1965) mostraram-se mais distantes em suas previsões.

Palavras-chave: Prova de carga; Recalque; Estimativa.

INTRODUÇÃO

Na Engenharia Geotécnica, ensaios de campo são frequentemente utilizados para determinar parâmetros físicos, de deformabilidade e de resistência do solo. Um desses ensaios, a prova de carga direta, proporciona uma curva que relaciona carga e recalque, ilustrando o comportamento do solo sob a aplicação de carga por uma placa de diâmetro específico. Existem diversos métodos descritos na literatura para estimar os recalques em fundações superficiais, incluindo abordagens diretas, semi-empíricas e empíricas.

Neste estudo, são empregados métodos diretos fundamentados na Teoria da Elasticidade, assim como métodos semi-empíricos desenvolvidos por Décourt (1992), Schmertmann (1978), Barata (1984), Burland & Burbidge (1985), Meyerhof (1965) e Sandroni (1991). Esses métodos são utilizados para estimar a curva carga x recalque, sendo os resultados comparados utilizando o método dos Mínimos Quadrados. Estudos anteriores, como o de Tan e Duncan (1991), que avaliaram 12 métodos diferentes de estimativa, consideraram critérios de precisão, confiabilidade e facilidade de aplicação, concluindo que cada método foi desenvolvido para atender a objetivos específicos.

Bungenstab (2010) discute a variabilidade dos resultados obtidos por métodos indiretos na previsão de recalques, comparando-os com os recalques observados durante o monitoramento de fundações rasas de um edifício.

LOCAL DE ESTUDO

O local de estudo é o Campo Experimental de Geotecnia e Fundações da Universidade Federal do Ceará (CEGEF – UFC). Está situado no Campus do Pici, em Fortaleza, Ceará. Abrangendo uma área de cerca de 900 m², encontra-se nas proximidades do Departamento de Educação Física.

MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, serão apresentados os materiais, caracterizados com base em ensaios prévios realizados, além da descrição dos métodos selecionados para calcular as estimativas de recalque no solo investigado.

Ensaio para obtenção de parâmetros do solo

Foram conduzidos ensaios geotécnicos de campo e laboratório para caracterizar o subsolo do CEGEF – UFC, conforme descrito em Moura et al. (2018). Os ensaios incluíram caracterização física, ensaios triaxiais, oedométricos, de cisalhamento direto e sondagem a percussão (SPT). A classificação do solo superficial, submetido às pressões da prova de carga direta neste estudo, pelo Sistema Unificado de Classificação (SUCS), é SM, indicando que é um solo granular do tipo areia-siltosa. A Tabela 1 apresenta um resumo das principais características e parâmetros do solo estudado.

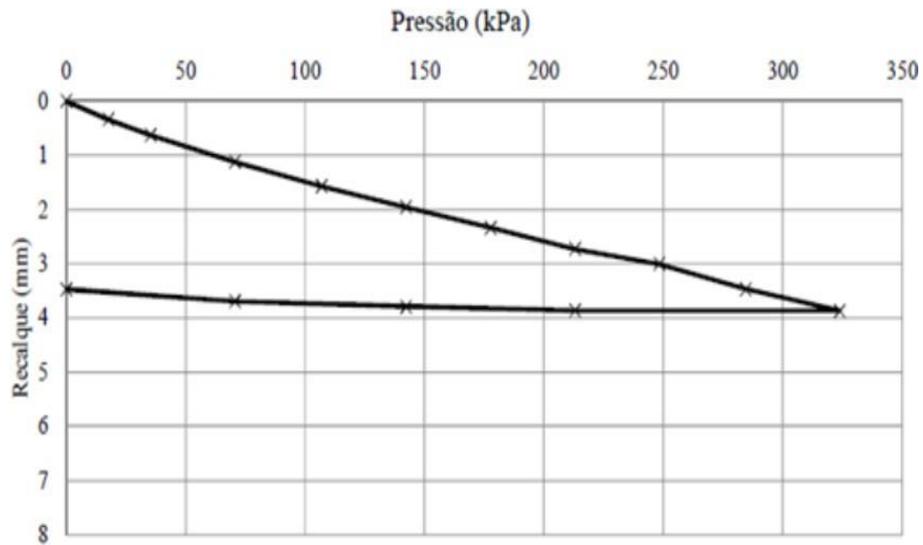
Tabela 1 – Resumo dos principais parâmetros do solo para a profundidade de 1,10 m.

Características/Parâmetros	110 cm	Forma de Obtenção
Classificação do solo	SM	Granulometria
Umidade natural (%)	12,4	Estufa
G _s (g/cm ³)	2,58	Picnômetro
γ _d (kN/m ³)	22,5	Compactação
w _{ot} (%)	9,6	Compactação
φ	31,8°	Cisalhamento direto
c (kPa)	1,3	Cisalhamento direto
φ	33,5°	Triaxial
c (kPa)	0	Triaxial
E (MPa)	20	Triaxial

Fonte: Moura et. al., (2018, p. 09)

Ensaio de Prova de carga direta com placa

Foi realizado um ensaio de Prova de Carga com uma placa de 50 cm de diâmetro sobre a superfície do solo, onde as cargas foram aplicadas em estágios. Os resultados deste ensaio estão representados no gráfico da Figura 1.

Figura 1 – Curva carga-recalque do ensaio de Prova de carga em placa.

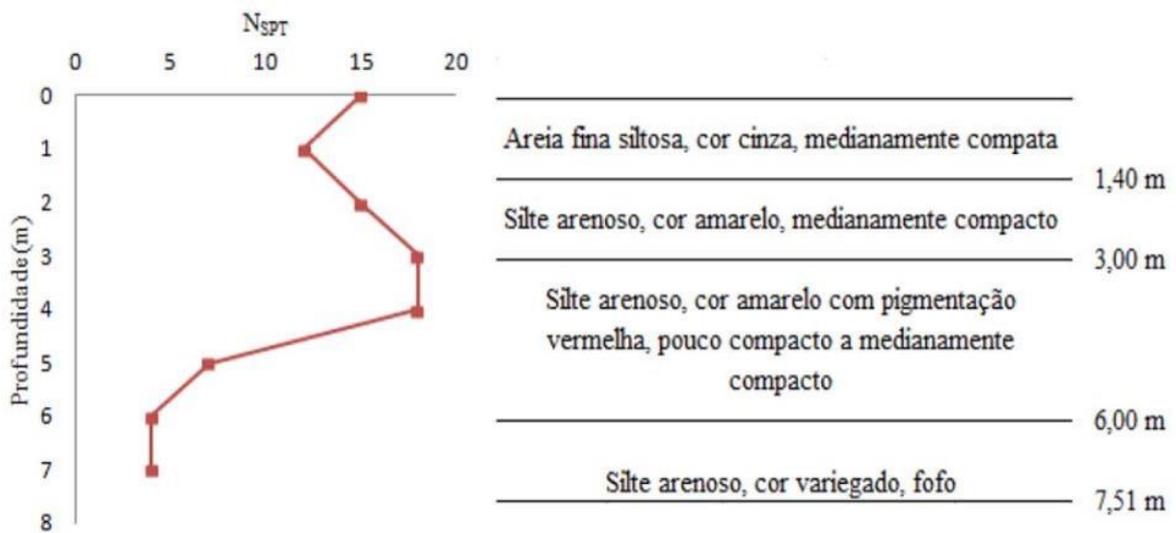
Fonte: ÑSAT., (2015)

Na curva carga x recalque, observa-se que o recalque máximo atingiu aproximadamente 3,87 mm, correspondente à tensão de 350 kPa. O recalque residual registrado foi de 3,5 mm.

Ensaio de Sondagem a Percussão (Standard Penetration Test)

Um ensaio de sondagem SPT (Standard Penetration Test) foi realizado a uma distância de 2,0 m do local onde a prova de carga direta foi conduzida. O perfil de sondagem pode ser visualizado na Figura 2.

Figura 2 – Perfil do índice de deformação específica.



Fonte: Moura et. al., (2018, p. 10)

PREVISÃO DE RECALQUE

Aqui estão resumidas as expressões de cada método utilizadas neste estudo.

Método Racional da Elasticidade

Para o caso de recalque de uma sapata sob carga centrada, o método racional utilizando a Teoria da Elasticidade faz uso de parâmetros de deformabilidade obtidos em laboratório e in situ, aplicando-os em modelos de previsão precisos. A equação a seguir pode ser utilizada:

$$w = q \times B \times \frac{1-\nu^2}{E} \times I_s \times I_d \times I_h \quad (1)$$

Onde:

w = recalque (mm);

q = pressão média aplicada (kPa);

B = menor dimensão da sapata (m);

ν = coeficiente de Poisson;

E = Módulo de Elasticidade (kPa);

I_s = Fator de forma do elemento de fundação;

I_d = Fator de profundidade/embutimento;

I_h = Fator de espessura de camada compressiva.

O valor de $I_s \times I_h$ é adotado como 1 para carregamentos na superfície de um meio de espessura finita (Harr, 1966). Outros valores podem ser obtidos pela Tabela 2.

Tabela 2 – Valores de $I_s \cdot I_h$ para carregamentos na superfície de um meio de espessura finita.

h/a	Círculo	Retângulo						
		$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	$m = 5$	$m = 7$	$m = 10$	$m = \infty$
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,2	0,096	0,096	0,098	0,098	0,099	0,099	0,099	0,100
0,5	0,225	0,226	0,231	0,233	0,236	0,237	0,238	0,239
1	0,396	0,403	0,427	0,435	0,441	0,444	0,446	0,452
2	0,578	0,609	0,698	0,727	0,748	0,757	0,764	0,784
3	0,661	0,711	0,856	0,910	0,952	0,965	0,982	1,018
5	0,740	0,800	1,010	1,119	1,201	1,238	1,256	1,323
7	0,776	0,842	1,094	1,223	1,346	1,402	1,442	1,532
10	0,818	0,873	1,155	1,309	1,475	1,556	1,619	1,758
∞	0,849	0,946	1,300	1,527	1,826	2,028	2,246	∞

h = espessura do meio; $a = B/2$; $m = L/B$

Fonte: Harr., (1966)

Método de Decourt (1992)

Decourt (1992) propôs uma equação semi-empírica baseada no valor do SPT (Standard Penetration Test) para calcular o recalque em solos arenosos. A equação leva em consideração a carga aplicada ao solo (q), a menor dimensão da fundação (B) e o valor médio do SPT para a profundidade do bulbo de tensões gerado pelo elemento de fundação.

$$S = 27 \times \frac{q \times B^{0,7}}{N_{spt}} \tag{2}$$

Onde:

S = recalque (cm);

q = pressão média aplicada (MPa);

B = menor dimensão da sapata (m);

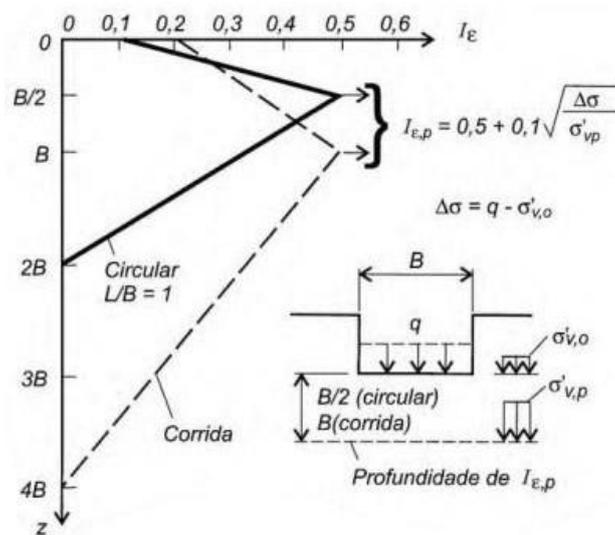
N_{spt} = valor médio do SPT.

Método de Schmertmann (1978)

Schmertmann (1978) observou em ensaios de placa de prova de carga que abaixo delas ocorria uma deformação específica ϵ_z . Essa deformação apresentava um pico na profundidade de B/2 e se anulava em 2B, para fundações com a relação L/B=1. Com base nessa observação, ele criou o Índice de deformação específica, definido como:

$$I_z = \epsilon_z \times \frac{E}{q} \tag{3}$$

Figura 3 – Perfil do Índice de deformação específica.



Fonte: Schmertmann., (1978, p. 1131-1135)

O pico é determinado com base no acréscimo de tensão, na tensão geostática e no alívio devido à escavação para o assentamento da fundação. Com o perfil do Índice de deformação específica construído e conhecido o valor de E, o recalque w pode ser calculado utilizando a seguinte equação:

$$w = \int_0^H \epsilon_z dz = q \int_0^{2B} \frac{I_e}{E} dz = q \sum_{i=1}^n \frac{I_{\epsilon,i}}{E_i} \Delta z \tag{4}$$

Schmertmann propôs duas correções a serem aplicadas para ajustar o recalque obtido pela equação 4. A primeira correção, C_1 , relacionada ao embutimento do elemento de fundação, é expressa da seguinte forma:

$$C_1 = 1 - 0,5 \times \frac{\sigma'_{v,0}}{q} \quad (5)$$

Onde:

C_1 = fator de correção de embutimento;

$\sigma'_{v,0}$ = tensão geostática na profundidade de assentamento da fundação (kPa);

q = tensão transmitida pelo elemento de fundação ao solo (kPa).

A segunda correção C_2 , que considera as deformações viscosas devido ao adensamento secundário do solo (creep), é representada pela seguinte equação:

$$C_2 = 1 + 0,2 \times \log \frac{t}{0,1} \quad (6)$$

Onde:

t = tempo em anos.

O recalque final w_f é dado por:

$$w_f = w \times C_1 \times C_2 \quad (7)$$

Em 1978, Schmertmann propôs novas correlações para o Módulo de Elasticidade (E) baseadas nos valores de q_c obtidos pelo ensaio de CPT (Cone Penetration Test). As correlações são as seguintes:

$$E = 2,5 \times q_c \text{ (Sapatas circulares e quadradas)} \quad (8)$$

$$E = 3,5 \times q_c \text{ (Sapatas corridas)} \quad (9)$$

Método de Barata (1984)

Barata (1984) propôs que o recalque fosse calculado pela Teoria da Elasticidade, utilizando o Módulo de Young obtido por meio do ensaio de CPT (Cone Penetration Test) com a seguinte correlação:

$$E = \eta \times q_c \quad (10)$$

Onde:

E = Módulo de Elasticidade (kPa);

h = coeficiente do tipo de solo sendo h = 2,0 para areias e h = 8,0 para argilas;

q_c = valor da resistência de ponta obtida pelo CPT (kPa).

A partir da obtenção do Módulo de Elasticidade e da pressão aplicada (σ) é possível, pela aplicação da Lei de Hooke, determinar a deformação para a camada de solo considerada. Pela Lei de Hooke:

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (11)$$

Onde:

E = Módulo de Elasticidade (kPa);

ε = deformação (m) e

σ = pressão aplicada (kPa).

Com a deformação ε a espessura da camada de solo (H) é possível determinar o recalque (w):

$$w = H \times \varepsilon \quad (12)$$

Onde:

H = espessura da camada de solo considerando a profundidade do bulbo de tensões (m);

ε = deformação (m);

w = recalque (m).

Método de Burland & Burbidge (1985)

O método de Burland & Burbidge (1985) define o recalque como uma expressão em função do valor do N_{SPT} (Standard Penetration Test), do fator de forma e do fator de espessura compressível.

$$w = q \times B^{0,7} \times \frac{1,71}{N^{1,4}} \times f_s \times f_i \quad (13)$$

Onde:

w = recalque (mm);

q = pressão aplicada (kN/m²);

B = menor dimensão da fundação (m);

N = média do número de golpes de N_{SPT} na profundidade do bulbo de tensões;

f_s = fator de forma dado por:

$$f_s = \frac{1,25 \times \frac{L}{B}}{\frac{L}{B} + 0,25} \quad (14)$$

f_i = fator de espessura compressível dado por:

$$f_i = \frac{H}{Z_1} \left(2 - \frac{H}{Z_1} \right) \quad (15)$$

Sendo que, para $H > Z_1$, $f_i = 1,0$.

Método de Meyerhof (1965)

O método de Meyerhof (1965) propõe que a relação entre a carga aplicada e o recalque admissível em areias pode ser expressa pelas seguintes equações:

$$q_{adm} = \frac{N_{SPT} \times w_{adm}}{8} \quad \text{para } B < 4' \quad (16)$$

$$q_{adm} = \frac{N_{SPT} \times w_{adm}}{12} \times \left(\frac{B+1'}{B} \right)^2 \quad \text{para } B > 4' \quad (17)$$

Onde:

B = menor lado da fundação (pés);

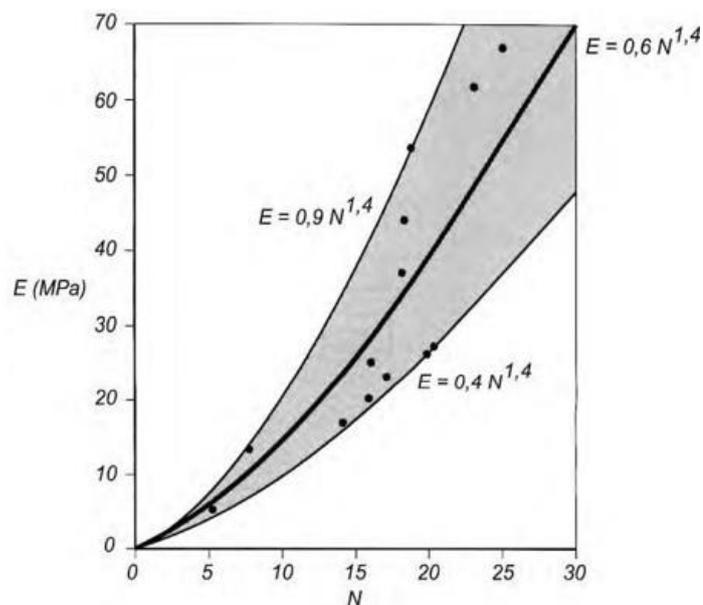
w_{adm} = recalque (polegadas);

q_{adm} = carga aplicada (kgf/cm^2).

Método de Sandroni (1991)

Sandroni (1991), utilizando resultados de provas de carga em solos residuais de gnaiss, propôs um gráfico e expressões que relacionam o número de golpes do SPT (Standard Penetration Test) com o Módulo de Elasticidade E do solo.

Figura 4 – Relação entre o NSPT e o Módulo de Elasticidade de solos residuais.



Fonte: Sandroni., (1991)

Após obter o Módulo de Elasticidade do solo, o cálculo do recalque pode ser realizado utilizando a Teoria da Elasticidade. A expressão (1) pode ser utilizada.

RESULTADOS E ANÁLISES

Nesta seção, são apresentados os resultados da estimativa de recalque utilizando os métodos descritos na metodologia, juntamente com a comparação aos dados experimentais obtidos pelo ensaio de prova de carga direta. Para ordenar os métodos que

mais se aproximam da curva experimental, utilizou-se o método dos Mínimos Quadrados. A Tabela 3 resume os valores de recalque calculados para cada um dos métodos propostos, juntamente com os respectivos erros mínimos quadrados (EMQ).

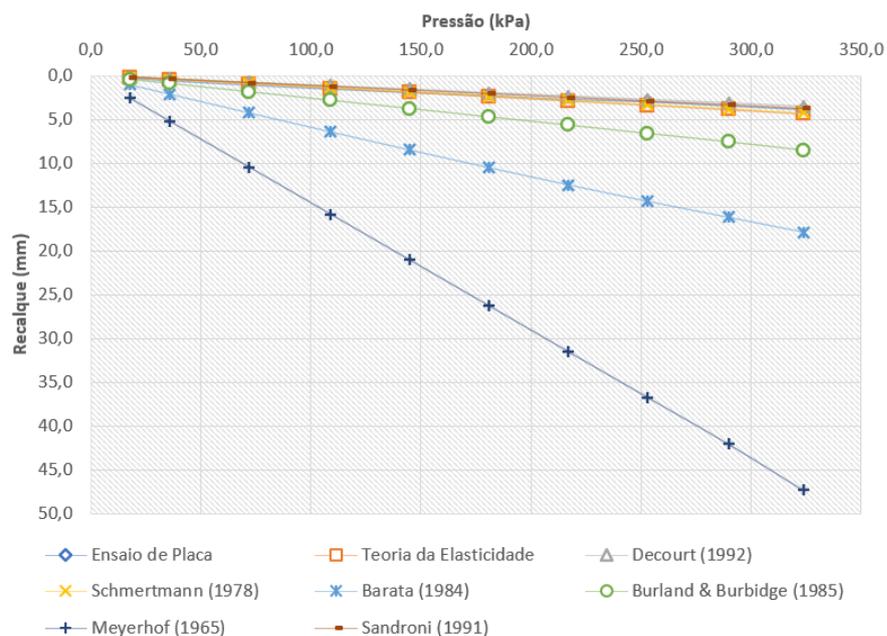
Tabela 3 – Resumo dos valores calculados de recalque (mm) por cada um dos métodos.

Estágio de carga	Pressão (kPa)	Ensaio de Placa	Teoria da Elasticidade	Decourt (1992)	Schmertmann (1978)	Barata (1984)	Burland & Burbidge (1985)	Meyerhof (1965)	Sandroni (1991)
1	18,0	0,34	0,24	0,20	0,23	1,07	0,47	2,61	0,21
2	36,0	0,64	0,48	0,39	0,47	2,14	0,94	5,23	0,41
3	72,0	1,13	0,96	0,79	0,94	4,27	1,88	10,45	0,83
4	109,0	1,57	1,46	1,19	1,42	6,44	2,85	15,82	1,25
5	145,0	1,95	1,94	1,58	1,89	8,51	3,79	21,05	1,67
6	181,0	2,33	2,43	1,97	2,36	10,53	4,74	26,27	2,08
7	217,0	2,73	2,91	2,37	2,83	12,49	5,68	31,50	2,49
8	253,0	2,99	3,39	2,76	3,29	14,36	6,62	36,72	2,91
9	290,0	3,46	3,89	3,16	3,78	16,20	7,59	42,09	3,33
10	323,7	3,87	4,37	3,56	4,24	17,88	8,53	47,32	3,75
EMQ			0,71	0,96	0,23	730,04	72,17	6599,92	0,49

Fonte: Elaborado pelos autores, 2024

A figura 5 ilustra graficamente o comportamento das curvas carga x recalque obtidas pelos métodos utilizados e do ensaio de prova de carga em placa realizado.

Figura 5 – Curva carga x recalque da curva experimental e métodos da literatura.

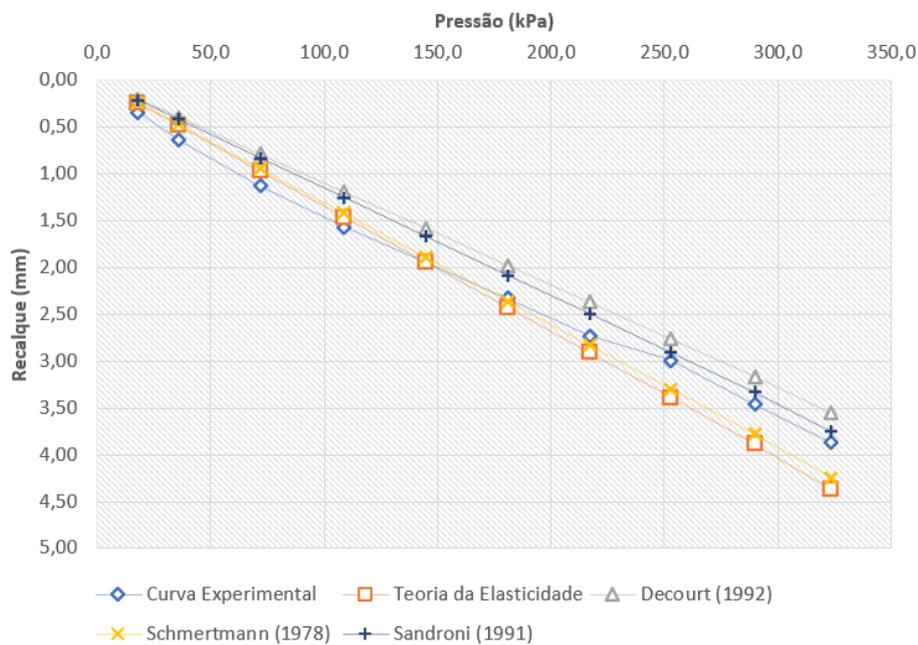


Fonte: Elaborado pelos autores, 2024

Os métodos que apresentaram previsões mais concordantes foram Schmertmann (1978), Sandroni (1991) e Teoria da Elasticidade, com valores de EMQ menores que 1. Os métodos de Meyerhof (1965), Barata (1984) e Burland & Burbidge (1985) mostraram EMQ com valores elevados, indicando que divergem do comportamento da curva carga x recalque experimental.

A figura 6 ilustra uma comparação entre a curva experimental e as curvas previstas pelos métodos mais convergentes.

Figura 6 – Curva carga x recalque da curva experimental e métodos com EMQ < 1.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2024

Pelo gráfico ilustrado na Figura 6, é perceptível que as estimativas feitas pelos métodos da Teoria da Elasticidade, Decourt (1992), Schmertmann (1978) e Sandroni (1991) apresentaram um comportamento próximo aos resultados experimentais. O método de Schmertmann (1978), com um EMQ de 0,23, foi o que mais se aproximou. É fundamental destacar que cada método possui considerações e características específicas de cálculo. Aqueles que incorporam o N_{SPT} em suas formulações referem-se ao valor médio da sondagem para a camada de solo considerada, incluindo o bulbo de tensões gerado pelos incrementos de pressão da prova de carga.

CONCLUSÕES

Este estudo investigou métodos de previsão de recalque em fundações diretas comparados com ensaios de prova de carga direta realizados no Campo Experimental de Geotecnia e Fundações da Universidade Federal do Ceará. Os resultados revelaram que os métodos baseados na Teoria da Elasticidade, especificamente os de Schmertmann (1978) e Sandroni (1991), apresentaram previsões mais consistentes em relação aos valores experimentais. A Teoria da Elasticidade demonstrou ser uma representação adequada do comportamento do solo sob carregamento, considerando sua capacidade de deformação elástica, embora com uma parcela de deformação não recuperável quando a carga é removida. Métodos cujos resultados divergiram dos valores experimentais podem ser justificados pelas simplificações e correlações específicas utilizadas, que podem não ser totalmente aplicáveis ao tipo de solo em questão. É importante notar que cada correlação introduz um erro associado, uma vez que não corresponde a uma determinação experimental ou laboratorial direta do parâmetro em questão. Em geral, os métodos indiretos para previsão de recalques em fundações superficiais são úteis no projeto geotécnico, mas devem ser empregados com cautela. Recomenda-se o uso de múltiplos métodos para verificar a consistência dos resultados, permitindo ao engenheiro geotécnico escolher um valor de recalque que esteja dentro da faixa aceitável de carga para o problema em questão.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam os seus sinceros agradecimentos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Programa de Pós-graduação do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental - DEHA da Universidade Federal do Ceará (UFC) pelo seu apoio.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6489: Solo – Prova de carga estática em fundação direta**. Rio de Janeiro. 2019.

BARATA, F. E. **Propriedades mecânicas dos solos - uma introdução ao projeto de fundações**. Rio de Janeiro. Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 1984.

BUNGENSTAB, FELIPE & BICALHO, KÁTIA & R., CASTELLO. (2010). **Estimativa de recalques em fundações superficiais apoiadas em solos arenosos**.

BURLAND, J. B.; BIJBIDGE, M. C. **Settlements of foundations on sand and gravel**. In: institution of civil engineers, 1985, London. Proceedings... London: Institution of Civil Engineers, 1985.

DÉCOURT, L., **SPT in non-classical material, Applicability of Classical Soil Mechanics Principles in Structured Soils**. Proc. US/Brazil Geotechnical Workshop, Belo Horizonte, pp.67-100, 1992.

HARR, M. E. **Foundations of theoretical soil mechanics**. New York: MacGraw-Hill Book Co., 1966.

MOURA, A. S.; RAMOS, M. R.; CERQUEIRA JÚNIOR, E.; BEZERRA DE MENEZES, P. H. L.; LIMA FILHO, F. P. (2018). **Caracterização preliminar geotécnica do subsolo do Campo Experimental de Geotecnia e de Fundações da Universidade Federal do Ceará (CEGEF – UFC)**. In: XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Salvador.

ÑSAT 2015 - **VIII Simpósio Brasileiro De Solos Não Saturados**, Fortaleza, Ceará.

SANDRONI, S. S. **Young metamorphic residual soils**. In: **Panamerican CSMFE**, 9., Viña del Mar, 1991. Proceedings...PCSMFE, 1991.

SCHMERTMANN, J. H. HARTMAN, J. P.; BROWN, P.R. “**Improved strain influence factor diagrams**”, Journal of Geotechnical Engng. Div., ASCE, 104(GT8), p. 1131-1135,1978.

TAN, C.K., DUNCAN, J.M. (1991). **Settlement of footings on sands – Accuracy and Reliability**. Geotechnical Engineering Congress, v.1, pg. 446-455.