

# Análise comparativa entre diferentes métodos de estimativa de recalques por previsão de prova de carga em placa

Matheus Vasconcelos do Nascimento

Universidade Federal do Ceará – UFC. Fortaleza. Brasil. [matheusvasna@gmail.com](mailto:matheusvasna@gmail.com)

Ana Cinthya Mariano de Sousa

Universidade Federal do Ceará – UFC. Fortaleza. Brasil. [engcynthia@gmail.com](mailto:engcynthia@gmail.com)

Ana Carolina Vasconcelos Silva

Universidade Federal do Ceará – UFC. Fortaleza. Brasil. [eng.anacarolinavasconcelos@gmail.com](mailto:eng.anacarolinavasconcelos@gmail.com)

Rodolfo Moreira Cavalcante

Universidade Federal do Ceará – UFC. Fortaleza. Brasil. [rodolfocavalcante@gmail.com](mailto:rodolfocavalcante@gmail.com)

Alfran Sampaio Moura

Universidade Federal do Ceará – UFC. Fortaleza. Brasil. [alfransampaio@ufc.br](mailto:alfransampaio@ufc.br)

**RESUMO:** O artigo analisa previsões dos recalques de uma prova de carga direta circular de 50 cm de diâmetro, realizada superficialmente no Campo Experimental de Geotecnia e Fundações da Universidade Federal do Ceará. Foram utilizados resultados de ensaios de laboratório e de campo, para a obtenção de parâmetros, e foram utilizados tanto a metodologia clássica da Teoria da Elasticidade quanto métodos semi-empíricos, incluindo os de Décourt (1965), Schmertmann (1978), Barata (1984), Burland & Burbidge (1985), Meyerhof (1965) e Sandroni (1991). Os ensaios de laboratório incluíram caracterização física, cisalhamento direto e ensaios triaxiais. Também foi realizada sondagem a percussão (SPT). Além disso, uma prova de carga direta (PCD) realizada no local conforme a norma NBR 6489/19 foi utilizada como referência para comparação entre os métodos de cálculo. A análise para estabelecer a convergência das previsões foi realizada através do método dos mínimos quadrados, destacando que os resultados mais próximos foram os de Schmertmann (1978) e Sandroni (1991), enquanto os mais distantes foram os de Burland & Burbidge (1985), Barata (1984) e Meyerhof (1965).

**PALAVRAS-CHAVE:** Prova de carga, Recalque, Estimativa.

**ABSTRACT:** The article analyzes the analysis of the settlements of a 50 cm diameter circular direct load test, carried out superficially at the Experimental Field of Geotechnics and Foundations of the Federal University of Ceará. Results from laboratory and field tests were used to obtain parameters, and both the classical methodology of the Theory of Elasticity and semi-empirical methods were used, including those of Décourt (1965), Schmertmann (1978), Barata (1984), Burland & Burbidge (1985), Meyerhof (1965) and Sandroni (1991). Laboratory tests included physical characterization, direct shear and triaxial tests. A standart penetration test (SPT) was also performed. Furthermore, a direct load test (PCD) carried out on site in accordance with the NBR 6489/19 standard was used as a reference for comparison between the design methods. The analysis to establish the convergence of variations was carried out using the least squares method, highlighting that the closest results were those of Schmertmann (1978) and Sandroni (1991), while the most distant were those of Burland & Burbidge (1985), Barata (1984) and Meyerhof (1965).

**KEYWORDS:** Load test, Settlement, Estimation.

## 1 INTRODUÇÃO

Na Engenharia Geotécnica, ensaios de campo são comuns para obter parâmetros físicos, de deformabilidade e de resistência do solo. A prova de carga direta gera uma curva carga x recalque, representando o comportamento do solo sob carga aplicada por uma placa de diâmetro específico. Diversos

métodos estão disponíveis na literatura para estimar os recalques em fundações superficiais, incluindo métodos diretos, semi-empíricos e empíricos. Neste estudo, são utilizados métodos diretos baseados na Teoria da Elasticidade e métodos semi-empíricos de Décourt (1965), Schmertmann (1978), Barata (1984), Burland & Burbidge (1985), Meyerhof (1965) e Sandroni (1991), para estimar a curva carga x recalque, comparando os resultados através do método dos Mínimos Quadrados. Estudos anteriores, como Tan e Duncan (1991) compararam 12 diferentes métodos estimativos considerando a precisão dos resultados, a confiabilidade e a facilidade de utilização. Concluíram que os métodos foram desenvolvidos para atingir objetivos distintos. Bungenstab (2010) discute a dispersão dos resultados obtidos pela utilização de métodos indiretos para a previsão de recalques e compara com os recalques obtidos por monitoramento de fundações rasas de um edifício.

## 2 LOCAL DE ESTUDO

O local de estudo é o Campo Experimental de Geotecnia e Fundações da Universidade Federal do Ceará (CEGEF – UFC). O mesmo fica localizado no Campus do Pici, em Fortaleza, Ceará. Compreende uma área de, aproximadamente, 900 m<sup>2</sup> e está situado próximo ao Departamento de Educação Física.

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, são apresentados os materiais, caracterizados a partir de ensaios previamente realizados, e a descrição dos métodos escolhidos para o cálculo das estimativas de recalque no solo estudado.

### 3.1 Ensaios realizados

#### 3.1.1 Ensaios para obtenção de parâmetros do solo

Ensaios geotécnicos, de campo e laboratório, para fins de caracterização do subsolo do CEGEF – UFC, foram realizados previamente e publicados em Moura et al (2018). Dentre eles: Ensaios de Caracterização Física, Triaxiais, Oedométricos, de Cisalhamento Direto e Sondagem a Percussão (SPT). A classificação do solo superficial, que corresponde a porção de solo submetida as tensões provenientes da prova de carga direta utilizada nesse trabalho, pelo Sistema Unificado de Classificação (SUCS) é SM, ou seja, trata-se de solo granular do tipo areia-siltosa. A Tabela 1 mostra um resumo com as principais características/parâmetros do solo estudado.

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

<b>Características/Parâmetros</b>	<b>110 cm</b>	<b>Forma de Obtenção</b>
Classificação do solo	SM	Granulometria
Umidade natural (%)	12,4	Estufa
G <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	2,58	Picnômetro
γ <sub>d</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	22,5	Compactação
w <sub>ot</sub> (%)	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

#### 3.1.2 Ensaio de Prova de carga com placa

O ensaio de Prova de Carga, com placa de 50 cm de diâmetro, foi realizado sobre a superfície do solo, onde as cargas foram aplicadas em estágios e resultou no gráfico da Figura 1.

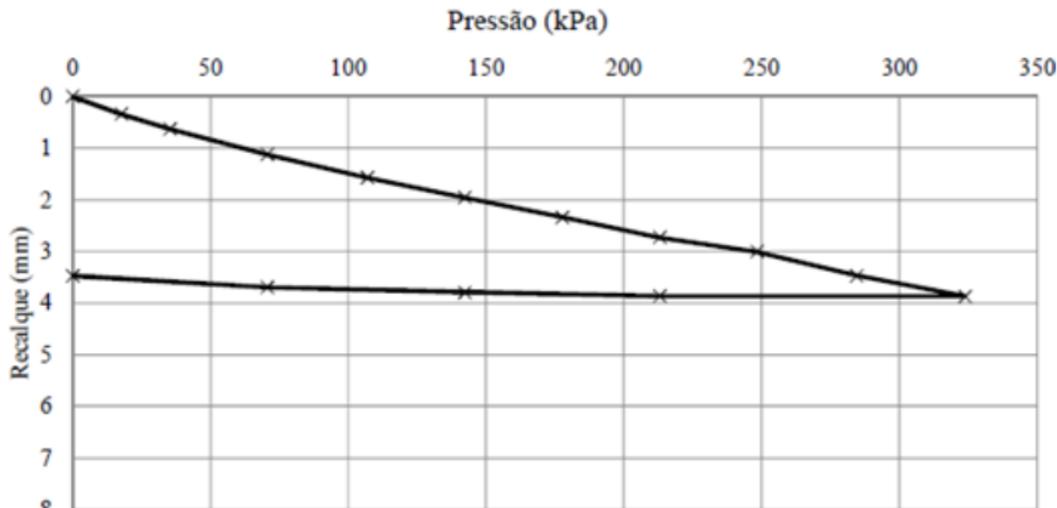


Figura 1. Perfil do índice de deformação específica. (Fonte: MOURA et. al., 2018).

Na curva carga x recalque é possível verificar o valor do recalque máximo de aproximadamente 3,87 mm, correspondente a tensão de 350 kPa. Já o recalque residual obtido foi de 3,5 mm.

### 3.1.3 Ensaio de Sondagem a Percussão (SPT)

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

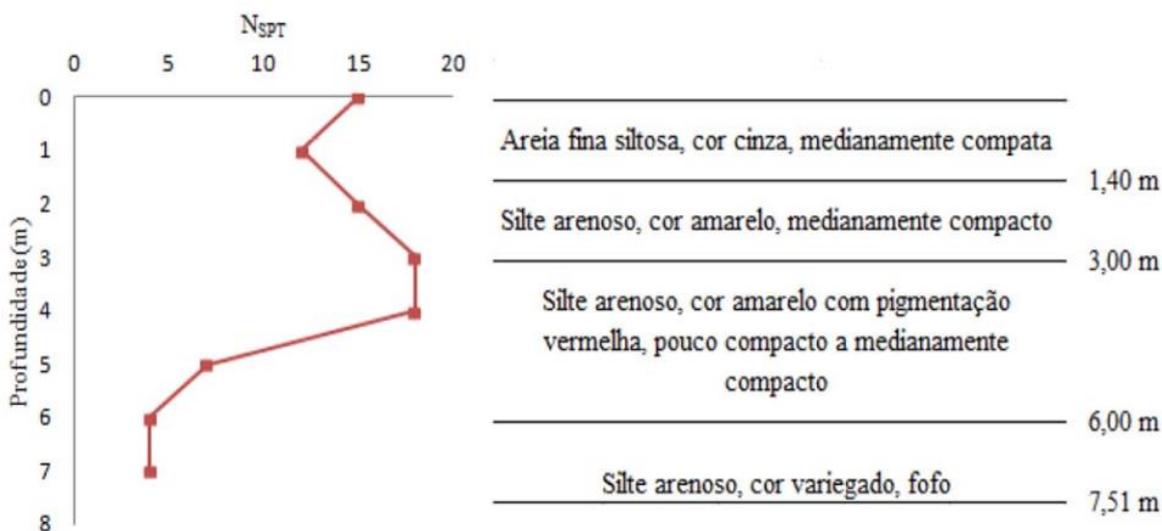


Figura 2. Resultado da sondagem à percussão realizada. (Fonte: MOURA et. al., 2018).

## 3.2 Previsão de Recalque

A seguir são apresentados, resumidamente, as expressões de cada método utilizadas neste trabalho.

### 3.2.1 Método Racional da Elasticidade

O método racional utilizando a Teoria da Elasticidade faz uso de parâmetros de deformabilidade obtidos em laboratório e em situ de modo a aplicar em modelos de previsão exatos. Para o caso de recalque de uma

sapata sob carga centrada, a seguinte equação 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);  $\nu$  = coeficiente de Poisson;  $E$  = Módulo de Elasticidade (kPa);  $I_s$  = Fator de forma do elemento de fundação;  $I_d$  = Fator de profundidade/embutimento e  $I_h$  = 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 (Harry, 1966).

### 3.2.2 Método de Decourt (1992)

Decourt (1992) propôs uma equação semi-empírica baseada no  $N_{spt}$  para o cálculo do recalque em solos arenosos. A equação considera a carga aplicada ao solo ( $q$ ), a menor dimensão da fundação ( $B$ ) e o valor médio do  $N_{spt}$  para a profundidade do bulbo de tensões gerado pelo elemento de fundação.

$$S = 27 \times \frac{q \times B^{0,7}}{N_{SPT}} \quad (2)$$

Onde:  $S$  = recalque (cm);  $q$  = pressão média aplicada (MPa);  $B$  = menor dimensão da sapata (m) e  $N_{SPT}$  = valor médio do SPT.

### 3.2.3 Método de Schmertmann (1978)

Schmertmann (1978) observou em ensaios de placa de prova de carga que abaixo dos mesmos ocorria uma deformação específica  $\varepsilon_z$ , que quando medida demonstrava haver um pico na profundidade de  $B/2$  e que se anulava em  $2B$ , para fundações com a relação  $L/B = 1$ . A partir dessa constatação criou o Índice de deformação específica, definido como:

$$I_e = \varepsilon_z \times \frac{E}{q} \quad (3)$$

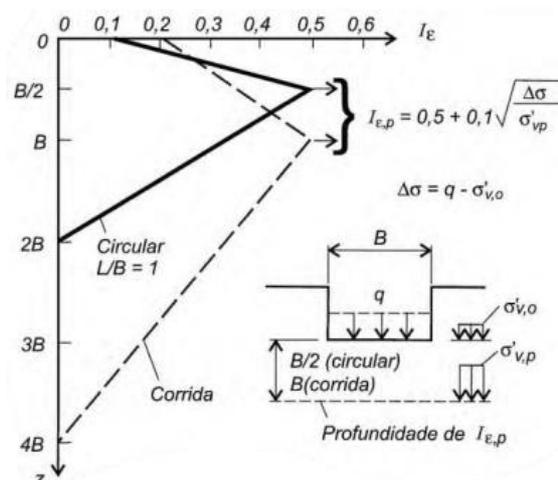


Figura 3. Perfil do índice de deformação específica.

O pico é determinado em função do acréscimo de tensão, da tensão geostática e do alívio devido a escavação para assentamento da fundação.

Com o perfil do índice de deformação específica construído e conhecido o valor de  $E$ , o recalque  $w$  pode ser calculado através da equação:

$$w = \int_0^H \varepsilon_z dz = q \int_0^{2B} \frac{I_e}{E} dz = q \sum_{i=1}^n \frac{I_{e_i}}{E_i} \Delta z \quad (4)$$

Schmertmann (1970) sugeriu duas correções a serem utilizadas para corrigir o recalque obtido pela equação 4. A primeira correção  $C_1$ , referente ao embutimento do elemento de fundação, é dada pela expressão:

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

Onde:  $C_1$  = fator de correção de embutimento;  $\sigma'_{v,0}$  = tensão geostática na profundidade de assentamento da fundação (kPa) e  $q$  = tensão transmitida pelo elemento de fundação ao solo (kPa).

A segunda correção  $C_2$ , considera as deformações viscosas oriundas do adensamento secundário do solo (creep), é definida como:

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

Onde:  $C_2$  = fator de correção de viscosidade (creep) e  $t$  = tempo (em anos).

Em 1978, propôs novas correlações para o Módulo de Elasticidade ( $E$ ), a partir dos valores de  $q_c$ , obtidos pelo ensaio de CPT (Cone Penetration Test). Sendo:

$$E = 2,5 \times q_c \text{ (Sapatas circulares e quadradas)} \quad (7)$$

$$E = 3,5 \times q_c \text{ (Sapatas corridas)} \quad (8)$$

### 3.2.4 Método de Barata (1984)

Barata (1984) propôs que o recalque fosse calculado pela Teoria da Elasticidade, com o Módulo de Young sendo obtido por meio do ensaio de CPT através da correlação:

$$E = \eta \times q_c \quad (9)$$

Onde:  $E$  = Módulo de Elasticidade (kPa);  $\eta$  = coeficiente do tipo de solo sendo  $\eta = 2,0$  para areias e  $\eta = 8,0$  para argilas e  $q_c$  = valor da resistência de ponta obtida pelo CPT (kPa).

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

Pela Lei de Hooke:

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (10)$$

Onde:  $E$  = Módulo de Elasticidade (kPa);  $\varepsilon$  = deformação (m) e  $\sigma$  = pressão aplicada (kPa).

Com a deformação ( $\varepsilon$ ) e a espessura da camada de solo ( $H$ ) é possível determinar o recalque ( $w$ ):

$$w = H \times \varepsilon \quad (11)$$

Onde:  $H$  = espessura da camada de solo considerando a profundidade do bulbo de tensões (m);  $\varepsilon$  = deformação (m) e  $w$  = recalque (m).

### 3.2.5 Método de Burland & Burbidge (1985)

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

$$w = q \times B^{0,7} \times \frac{1,71}{N^{1,4}} \times f_s \times f_l \quad (12)$$

Onde:  $w$  = recalque (mm);  $q$  = pressão aplicada ( $\text{kN/m}^2$ );  $B$  = menor dimensão da fundação (m) e  $N$  = média do número de golpes na profundidade do bulbo;

$f_s$  = fator de forma dado por:

$$f_s = \frac{1,25 \times \frac{L}{B}}{\frac{L}{B} + 0,25} \quad (13)$$

$f_l$  = fator de espessura compressível dado por:

$$f_l = \frac{H}{Z_1} \left( 2 - \frac{H}{Z_1} \right) \quad (14)$$

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

### 3.2.6 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 dado pelas expressões:

$$q_{adm} = \frac{N_{SPT} \times w_{adm}}{8} \quad \text{para } B < 4' \quad (15)$$

$$q_{adm} = \frac{N_{SPT} \times w_{adm}}{12} \times \left( \frac{B+1'}{B} \right)^2 \quad \text{para } B > 4' \quad (16)$$

Onde:  $B$  = menor lado da fundação (pés);  $w_{adm}$  = recalque (pol.) e  $q_{adm}$  = carga aplicada ( $\text{kgf/cm}^2$ ).

### 3.2.7 Método de Sandroni (1991)

Sandroni (1991), utilizando dos resultados de provas de carga em solos residuais em gnaisse, propôs um gráfico, com expressões que relacionam o  $N$  do SPT com o Módulo de Elasticidade  $E$  do solo.

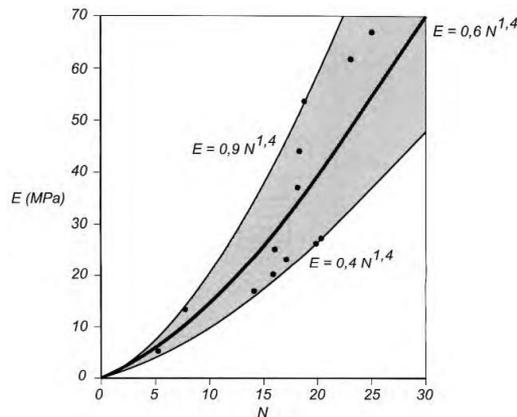


Figura 4. Relação entre o  $N_{SPT}$  e o Módulo de Elasticidade de solos residuais

A partir da obtenção do Módulo de Elasticidade para o solo, o cálculo do recalque pode ser realizado com o uso da Teoria da Elasticidade. A expressão (1) pode ser utilizada.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

Nesta seção, são apresentados os resultados encontrados para a estimativa de recalque utilizando os métodos descritos na metodologia, bem como a comparação com os dados experimentais obtidos pelo ensaio de prova de carga direta. Para realizar a ordenação dos métodos que mais se aproximam da curva experimental

utilizou-se do método dos Mínimos quadrados. Na Tabela 2 é apresentado um resumo dos valores de recalque calculados para cada um dos métodos propostos e os respectivos erros mínimos quadrados (EMQ).

Tabela 2. 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 (1992)	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

Os métodos que apresentaram previsões mais concordantes foram Schmertmann (1978), Sandroni (1991) e Teoria da Elasticidade com valores de EMQ menores que 1. Já os métodos de Meyerhof (1965), Barata (1984) e Burland & Burbidge (1985) apresentaram EMQ com valores elevados demonstrando que divergem do comportamento da curva carga x recalque experimental. A figura 5 mostra uma comparação entre a curva experimental e as curvas previstas pelos métodos mais convergentes.

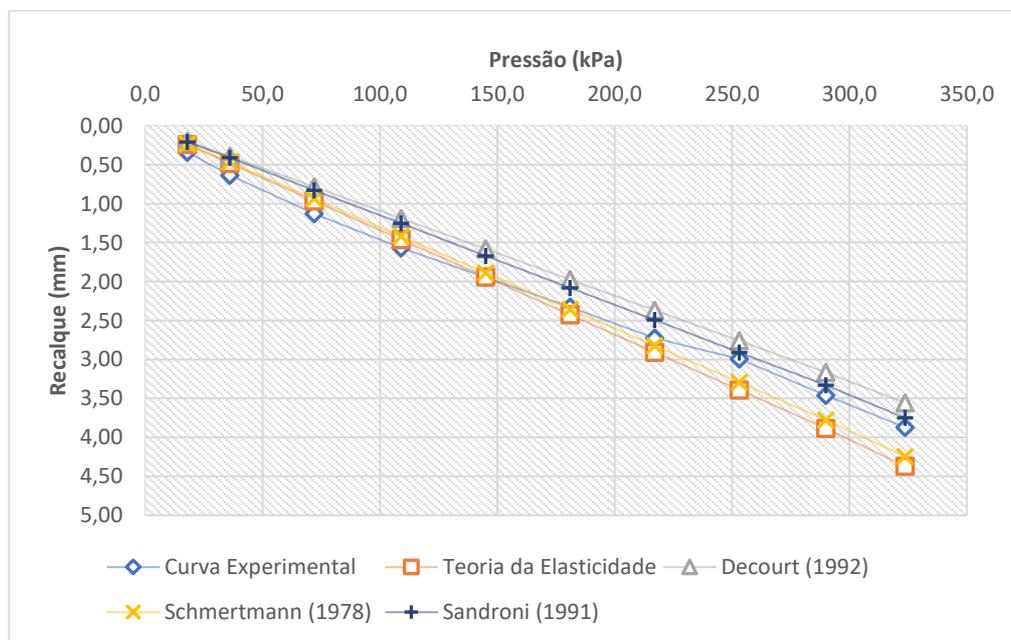


Figura 5. Curva carga x recalque da curva experimental e dos métodos com EMQ < 1.

Pelo gráfico ilustrado na Figura 5, é possível visualizar que as estimativas obtidas pelos métodos da Teoria da Elasticidade, Decourt (1992), Schmertmann (1978) e Sandroni (1991) tiveram um comportamento convergente aos resultados experimentais. O método de Schmertmann (1978), com EMQ = 0,23, foi o método que mais convergiu. É importante ressaltar que cada método possui considerações e características próprias de cálculo. Os que consideram o  $N_{SPT}$  em seus cálculos se referem ao valor médio da sondagem para a camada de solo considerada, seja a do bulbo de tensões gerado pelos acréscimos de pressão da prova de carga.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo sobre a utilização de métodos de previsão de recalque em fundações diretas comparados a um ensaio de prova de carga direta realizado no Campo Experimental de Geotecnia e Fundações da Universidade Federal do Ceará. Por meio dos resultados, constatou-se que os métodos da Teoria da Elasticidade, de Schmertmann (1978) e Sandroni (1991) conduziram a previsões mais concordantes em relação aos valores experimentais. A teoria da Elasticidade mostrou-se bem representativa do comportamento do solo quando submetido a carregamentos, como se o mesmo tivesse um comportamento mais elástico, muito embora exista uma parcela de deformação não recuperável quando a pressão aplicada é removida. Os métodos cujos resultados não se aproximaram dos valores experimentais justificam tal fato pelas considerações realizadas em suas formulações, o tipo de solo em que foram desenvolvidas e as correlações utilizadas. Importa destacar que a cada correlação utilizada é assumido um erro associado, visto que tal ajuste não corresponde a uma determinação experimental nem laboratorial do parâmetro a ser definido. De um modo geral, os métodos indiretos para a previsão de recalques em fundações rasas são úteis para o projeto de fundações, mas devem ser utilizados com cautela. Recomenda-se a utilização de mais de um método para verificar a convergência dos resultados entre eles, a fim de que, a partir dessa análise, o engenheiro geotécnico assumira um valor de previsão para os recalques dentro da faixa de carga considerada no seu problema.

## 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 BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- 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.
- Sandroni, S. S., Maccarini, M. Ensaios triaxiais e de cisalhamento direto em uma ocorrência de solo residual gnáissico jovem rico em feldspato. In: Simpósio Brasileiro de solos tropicais, 1981, Rio de Janeiro, anais... Rio de Janeiro: ABMS, 1981. P.
- Schmertmann, J. H. Static cone to compute settlement over sand. Journal Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, v. 96, n. SM3, p. 1011-1043, 1970.
- Schnaid, F. (2000). Ensaios de Campo e suas aplicações à engenharia de fundações/ Fernando Schnaid – São Paulo: Oficina de Textos, 2000.
- Tan, C.K., Duncan, J.M. (1991). Settlement of footings on sands – Accuracy and Reliability. Geotechnical Engineering Congress, v.1, pg. 446-455.