

Avaliação da eficiência das sondagens à percussão nas previsões de capacidade de carga e de recalque em estacas pré-moldadas

Assessment of the efficiency of percussion soundings in predicting load capacity and settlement in precast piles

Evaluación de la Eficiencia del sondeo a la percusión en las previsiones de capacidad de carga y de consolidación del suelo en pilotes premoldeados

Resumo

Em projetos de edifícios, as fundações devem atender a requisitos de projetos para a garantia da segurança da obra. Dessa forma, estimativas de capacidade de carga e recalques das fundações são necessárias. É usual efetuar essas estimativas a partir de resultados de ensaios de campo. O presente trabalho propõe uma avaliação das previsões de capacidade de carga e recalques de fundações em estacas pré-moldadas, utilizando métodos semiempíricos e teóricos baseados nos resultados de sondagem à percussão (SPT), com e sem a consideração da correção da eficiência do ensaio. Para tanto, foram analisadas 7 estacas, fabricadas em concreto armado, e cravadas em perfis de solos típicos da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). Para a avaliação proposta, foram utilizados os resultados de provas de carga e de sondagens SPT. As previsões, estimadas por métodos semiempíricos e teóricos foram comparadas aos valores obtidos experimentalmente pelas provas de carga. As previsões, de capacidade de carga e de recalque, foram efetuadas sem a correção da eficiência das sondagens e, também, para a eficiência de 70%. A consideração da correção da eficiência das sondagens SPT, tanto em cálculos de capacidade de carga quanto de recalque, promoveu previsões mais concordantes para a quase totalidade das situações analisadas.

Palavras-chave: capacidade de carga; recalques; prova de carga; sondagem SPT; estacas.

Abstract

In building projects, foundations must meet project requirements to ensure the safety of the work. Therefore, estimates of load capacity and foundation settlements are necessary. It is usual to make these estimates based on the results of field trials. The present work proposes an evaluation of the predictions of load capacity and settlements of foundations on precast piles using semi-empirical and theoretical methods based on the results of percussion sounding (SPT), with and without consideration of the test efficiency correction. To this end, seven piles were analyzed, manufactured in reinforced concrete, and driven into typical soil profiles of the Metropolitan Region of Fortaleza (RMF). For the proposed evaluation, the results of load tests and SPT surveys were used. The predictions estimated by semi-empirical and theoretical methods were compared to the values obtained experimentally through load tests. The load capacity and settlement predictions were made without correcting the sounding efficiency and for an efficiency of 70%. Considering the correction of the efficiency of SPT soundings, both in load capacity and settlement calculations, promoted more consistent predictions for almost all situations analyzed.

Keywords: load capacity; repressions; load test; SPT survey; piles

**Yan Carlos Chiu
Rodriguez**

Universidade Federal do
Ceará, Fortaleza, Ceará,
Brasil
yancarloschiu@gmail.com

Alfran Sampaio Moura

Universidade Federal do
Ceará, Fortaleza, Ceará,
Brasil
alfransampaio@ufc.br

Danton França da Silva

Universidade Federal do
Ceará, Fortaleza, Ceará,
Brasil
dantonfranca@alu.ufc.br

**Lucas Pereira
Cavalcante**

Universidade Federal do
Ceará, Fortaleza, Ceará,
Brasil
lucaspengenharia@gmail.com

Resumen

En proyectos de edificios, las fundaciones deben atender a los requisitos de proyectos para garantizar la seguridad de la obra. De este modo, estimativas de capacidad de carga y consolidaciones de las fundaciones son necesarias. Son usuales estas estimativas a partir de resultados de ensayos de campo. El presente trabajo propone una evaluación de las previsiones de capacidad de carga y consolidación de fundaciones en pilotes premoldeados utilizando métodos semiempíricos y teóricos basados en los resultados de sondeo a la percusión (SPT), con y sin la consideración de la corrección de la eficiencia del ensayo. Para tanto, fueron analizados 7 pilotes, fabricados en hormigón armado, y clavadas en perfiles de suelos típicos de la Región Metropolitana de Fortaleza (RMF). Para la evaluación propuesta fueron utilizados los resultados de pruebas de carga y sondeos SPT. Las previsiones, estimadas por métodos semiempíricos y teóricos, fueron comparadas a los valores obtenidos experimentalmente por las pruebas de carga. Las previsiones, de capacidad de carga y de consolidación, fueron efectuadas sin la corrección de la eficiencia de los sondeos y también, para la eficiencia de 70%. La consideración de la correlación de la eficiencia de los sondeos SPT, tanto en cálculos de capacidad de carga cuanto de consolidación, promovió previsiones más de acuerdo para casi la totalidad de las situaciones analizadas.

Palabras clave: capacidad de carga; consolidaciones; prueba de carga; sondeo SPT; pilotes.

1 Introdução

As estacas pré-moldadas são comumente aplicadas como alternativas de fundações indicadas em casos que a vizinhança não é sensível a vibrações em decorrência da cravação de estacas, quando se quer transpor espessas camadas de solo de baixa capacidade de suporte e quando não há a presença de pedregulhos e matacões.

Para o dimensionamento, as fundações devem apresentar condições satisfatórias quanto ao estado limite último (ELU) do sistema solo-fundação e estado limite de serviço (ELS). Para isso, ainda na fase de projeto, previsões de capacidade de carga e recalques das estacas são necessárias. A sondagem SPT é o mais conhecido e utilizado ensaio para investigação em campo. O valor do índice de resistência das sondagens à percussão (N_{SPT}) varia conforme a energia transmitida do martelo ao amostrador, por meio das hastes, em decorrência de fatores humanos, de equipamentos e/ou de procedimentos.

Moura, Nóbrega Júnior e Aguiar (2011) avaliaram a aplicação de estimativas semiempíricas de capacidade de carga em estacas raiz na cidade de Fortaleza, Ceará. As estimativas realizadas apontaram que, para as estacas de pequeno diâmetro (até 250 mm), os métodos de Salioni (1985) e Décourt e Quaresma (1978) apresentam os resultados mais concordantes com os valores obtidos através das extrapolações da curva carga-recalque, pelo método de Van der Veen (1953) e o método de Aoki e Velloso (1975), os valores mais destoantes aos valores de referência.

Tendência similar foi vista em estacas hélice contínua monitoradas executadas em Fortaleza, Ceará, os quais Sousa et al. (2018) concluíram que os métodos de Antunes e Cabral (1996) e Décourt e Quaresma (1982) apresentaram os resultados mais satisfatórios em relação aos valores obtidos pelo método de Van der Veen (1953).

Aguiar et al. (2016), analisando a estimativa de recalque de estacas em solos silto-arenosos em Fortaleza, avaliaram a previsão de recalques pelos métodos semiempíricos de Aoki (1984) e Bowles (1997). Verificou-se que as estimativas foram inconsistentes, apresentando valores superiores aos obtidos por prova de carga.

Bezerra et al. (2021) avaliaram a precisão dos métodos de transferência de carga para previsão de estacas escavadas em solo granular, a partir de estudos experimentais realizados em Fortaleza, Ceará. Para a previsão de recalques, realizou-se estimativas a partir de funções de transferência de carga, analítico e numérico, com parâmetros de entrada obtidos dos ensaios de compressão triaxial, cisalhamento direto e SPT. Obteve-se do

estudo que todas as estimativas apresentaram concordância aos valores experimentais na zona elástica do comportamento do solo e, que, para a carga de trabalho, a proposta de Massad (1992) apresentou a maior convergência ao valor experimental.

Dessa forma, o presente estudo estima a eficiência das sondagens à percussão (SPT) consideradas no trabalho pelos métodos da teoria newtoniana aplicada ao SPT proposto por De Mello (1971). Em seguida, previsões de capacidade de carga e recalque, para a carga de trabalho de 7 estacas pré-moldadas de concreto, são efetuadas, para o N_{SPT} não corrigido e corrigido para uma eficiência de 70%. Para tanto, utilizaram-se os métodos semiempíricos de Aoki e Velloso (1975), Monteiro (1997), Décourt e Quaresma (1982) e Teixeira (1996) para a previsão da capacidade de carga e os métodos de Poulos e Davis (1980), Aoki (1984) e Bowles (1997) para a estimativa dos recalques.

2 Referencial teórico

2.1 Métodos de previsão de capacidade de carga

Conforme Velloso e Lopes (2010), a capacidade de carga pode ser estimada a partir de métodos estáticos ou dinâmicos, onde o primeiro se subdivide em métodos teóricos e semiempíricos. Os métodos semiempíricos são baseados em modelos teóricos associado a resultados de ensaios de campo como, por exemplo, sondagens à percussão (SPT) e aos ensaios de penetração do cone (CPT), por meio de correlações de parâmetros medidos em campo. Dentre os principais métodos semiempíricos baseados no SPT para estimativa de capacidade de carga de estacas cravadas, destacam-se os métodos de Aoki e Velloso (1975), Monteiro (1997), Décourt e Quaresma (1982) e Teixeira (1996).

A capacidade de carga (Q_{ult}) de uma estaca consiste na soma das parcelas de cargas resistida pelo fuste e pela ponta, conforme descrita nas Eq. (1) a Eq. (3).

$$Q_{ult} = Q_L + Q_P \quad (1)$$

$$Q_L = U \cdot \sum (r_L \cdot \Delta_L) \quad (2)$$

$$Q_P = r_p \cdot A_p \quad (3)$$

Onde: Q_{ult} – capacidade de carga do sistema solo-fundação; Q_L – carga axial absorvida pelo fuste; Q_P – carga axial absorvida pela ponta; U – perímetro da seção transversal; Δ_L – segmento da estaca; r_L e r_p – resistência unitária ao atrito lateral e de ponta, respectivamente; A_p – área da seção transversal no nível da ponta.

Os diferentes métodos semiempíricos baseados no índice de resistência (N_{SPT}) de sondagens à percussão são distinguidos, principalmente, quanto ao cálculo das resistências ao atrito lateral e de ponta, r_L e r_p (respectivamente), e, alguns, na forma de considerar o N_{SPT} característico nos cálculos.

O método de Aoki e Velloso (1975) foi elaborado, inicialmente, correlacionando as resistências de ponta (r_p) e atrito lateral (r_L) aos parâmetros obtidos no ensaio do cone (CPT), sendo estes, por fim, correlacionados com o N_{SPT} conforme Eq. (4) e Eq. (5), respectivamente.

$$r_p = \frac{q_c}{F_1} = \frac{k \cdot N_{SPT,P}}{F_1} \quad (4)$$

$$r_L = \frac{f_s}{F_2} = \frac{\alpha \cdot k \cdot N_{SPT,L}}{F_2} \quad (5)$$

Onde: q_c e f_s – resistência de ponta e atrito unitário na luva obtido do ensaio CPT, respectivamente; F_1 e F_2 – fatores de correção em função do tipo de estaca; k e α – coeficiente e razão de atrito, respectivamente, obtidos em função do tipo de solo; $N_{SPT,P}$ e $N_{SPT,L}$ – N_{SPT} no nível da ponta e N_{SPT} médio ao longo do fuste, respectivamente.

O método de Monteiro (1997), por sua vez, estabelece novos valores dos coeficientes presentes no método de Aoki e Velloso (1975), a saber, k , α , F_1 e F_2 . Além disso, o método de Monteiro (1997) se diferencia do método de Aoki e Velloso (1975) por abranger mais tipos de estacas, delimita valores de N_{SPT} até 40 golpes e considera o efeito de resistência de ponta no intervalo entre 7 e 3,5 diâmetros a partir da ponta da estaca, para cima e para baixo, respectivamente.

O método de Décourt e Quaresma (1982) foi desenvolvido a partir do método de Décourt e Quaresma (1978), cuja proposta inicial objetivou a determinação da capacidade de carga a partir das sondagens SPT, propriamente dito, modificando posteriormente apenas o cálculo da resistência lateral. A Eq. (6) e Eq. (7) expressam os valores de resistência lateral e de ponta pelo método de Décourt e Quaresma (1982).

$$r_P = C \cdot N_{SPT,P} \quad (6)$$

$$r_L = \frac{N_{SPT,L}}{3} + 1 \quad (7)$$

Onde: C – coeficiente em função do tipo de solo (em tf/m^2); $N_{SPT,P}$ – média do N_{SPT} da ponta da estaca, do metro imediatamente superior e inferior; r_L – resistência lateral (em tf/m^2).

Por fim, o método de Teixeira (1996) denomina parâmetros α e β para a determinação das resistências de ponta e lateral, respectivamente, permitindo a simplificação das Eq. (1) a Eq. (3) na Eq. (8).

$$Q_{ult} = \alpha \cdot N_{SPT,P} \cdot A_p + U \cdot \beta \cdot N_{SPT,L} \cdot \Delta_L \quad (8)$$

Onde: α – coeficiente em função do tipo de solo e da estaca; β – coeficiente em função do tipo de estaca; $N_{SPT,P}$ - média do N_{SPT} no intervalo de 4 e 1 diâmetros a partir da ponta da estaca, para cima e para baixo, respectivamente.

Além dos métodos semiempíricos, a capacidade de carga pode ser determinada por métodos baseados na curva carga-recalque obtido da prova de carga, a partir da determinação de ruptura convencional ou extrapolando a curva carga-recalque. O método da norma NBR 6122, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019), é um exemplo de método que expressa ruptura convencional, quando não há ruptura nítida definida enquanto carga correspondente, na curva carga-recalque, recalque dado pela Eq. (9).

$$w_{ult} = \frac{Q_{ult} \cdot L}{A \cdot E_p} + \frac{D}{30} \quad (9)$$

Onde: w_{ult} – recalque de ruptura; L – comprimento da estaca; A – área da seção transversal; E_p – módulo de elasticidade da estaca; D – diâmetro da estaca.

A literatura disponibiliza vários métodos de extrapolação da curva carga-recalque, dentre os quais, cita-se o método de Van der Veen (1953), Chin (1970) e Mazurkiewicz (1972). O método de Van der Veen (1953) propõe que a curva carga-recalque segue função exponencial, sendo obtido a extrapolação através de regressão linear. O método de Chin (1970) adota que a curva segue uma função hiperbólica próxima à ruptura, permitindo a obtenção dos parâmetros da curva hiperbólica a partir do gráfico w/Q x w , sendo este método desenvolvido em casos que as provas de carga são realizadas em estágios com tempo de aplicação constante. Por fim, o método de Mazurkiewicz (1972) é um método que usa um processo gráfico para extrapolação da curva carga-recalque a uma curva parabólica, a partir da divisão da curva em recalques de iguais magnitudes.

2.2 Métodos de previsão de recalques

Os recalques podem ser obtidos diretamente em campo por meio de provas de carga ou calculados, segundo Velloso e Lopes (2010), a partir de métodos baseados na teoria da elasticidade, numéricos ou semiempíricos. Dentre os métodos teóricos, baseados na teoria da elasticidade, destaca-se o método de Poulos e Davis (1980) e dentre os métodos semiempíricos, destacam-se os métodos de Aoki (1984) e Bowles (1997) baseados no índice de resistência à penetração do solo, N_{SPT} .

A metodologia de cálculo apresentada por Poulos e Davis (1980), conforme Eq. (10), simplifica a estimativa para uma situação particular de uma estaca incompressível em um meio argiloso, com comportamento elástico linear, homogêneo e definido em um espaço semi-infinito. Para meios distintos ao caso anteriormente mencionado, realiza-se a correção do fator de influência conforme Eq. (11). Cabe salientar que os fatores de correção são estimados de acordo com geometria da fundação e elasticidade do solo, com obtenção dos valores por meio de ábacos.

$$w = \frac{Q \cdot I}{E_s \cdot B} \quad (10)$$

$$I = I_0 \cdot R_k \cdot R_h \cdot R_v \cdot R_b \quad (11)$$

Onde: w – recalque; Q – carga aplicada; E_s – módulo de elasticidade do solo, definido conforme Poulos e Davis (1980) em função do tipo de solo e compacidade ou consistência; B – diâmetro da estaca; I – fator de influência corrigido; I_0 – fator de influência inicial; R_k , R_h , R_v , R_b – fatores de correção quanto à compressibilidade da estaca, espessura da camada compressível, coeficiente de Poisson e base mais rígida, respectivamente.

Os métodos de Aoki (1984) e Bowles (1997) são baseados na compreensão que o recalque total no topo da estaca pode ser obtido, conforme Eq. (12), como a soma das parcelas de deformação observadas tanto na lateral como na ponta, expressas respectivamente pelo encurtamento elástico no nível do fuste da estaca, apresentada na Eq. (13), e pela compressão do solo no nível da base da estaca.

$$w = w_e + w_s \quad (12)$$

$$w_e = \frac{\sum_i (P_i \cdot L_i)}{A \cdot E_p} \quad (13)$$

Onde: w_e – encurtamento elástico da estaca; w_s – recalque devido à compressão do solo no nível da base da estaca; P_i – carga axial média da camada; L_i – comprimento da camada.

As Eq. (14) a (16) expressam os cálculos pelo método de Aoki (1984) do recalque de acordo com a compressão do solo no nível da base, além dos parâmetros de deformabilidade do solo, como módulo de elasticidade e módulo de deformabilidade inicial, respectivamente.

$$w_s = \frac{\sum_i (\Delta\sigma_i \cdot L_i)}{E_s} \quad (14)$$

$$E_s = E_0 \cdot \left(\frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (15)$$

$$E_0 = \alpha \cdot K \cdot N_{SPT} \quad (16)$$

Onde: $\Delta\sigma$ – acréscimo de tensão total; E_0 – módulo de deformabilidade do solo antes da execução da estaca; σ_0 – tensão geostática vertical inicial no centro da camada; n – coeficiente dependente da natureza do solo (0,5 para solos granulares e 0 para argilas duras e rijas); α – coeficiente relacionado ao método executivo da estaca; K – coeficiente empírico do método de Aoki e Velloso (1975) quanto ao tipo de solo.

O recalque estimado pelo método de Bowles (1997) é expresso de acordo com critérios de deformabilidade do solo comprimido, sendo associado à compressão do solo na base da estaca e ao módulo de elasticidade do solo, conforme apresentado nas Eq. (17) e Eq. (18).

$$w_s = \Delta q \cdot B \cdot \frac{1 - \nu}{E_s} \cdot m \cdot I_s \cdot I_F \cdot F_1 \quad (17)$$

$$E_s = 500 \cdot (N_{SPT} + 15) \quad (18)$$

Onde: Δq – carga aplicada por unidade de área; ν – coeficiente de Poisson (o método sugere valor de 0,35); m_l – equivalente a 1; I_F – fator que depende da razão comprimento por diâmetro da estaca; F_1 – fator de redução devido ao mecanismo de transferência de carga (0,5 se houver carga de ponta e 0,25 se não houver).

2.3 Eficiência de sondagens à percussão

O valor de N_{SPT} obtido de furos de sondagem à percussão é influenciado significativamente pela energia proveniente do martelo, que é transmitida ao amostrador por meio das hastes. No Brasil, De Mello (1971) estudou a energia transmitida às hastes utilizando a teoria newtoniana para impactos de corpos rígidos com coeficientes de restituição. Ademais, considera-se que o amostrador inicia sua penetração apenas quando a onda longitudinal incide sobre ele, cuja energia contida pode ser descrita como duas parcelas: de deformação e cinética, as quais estão associadas à compressão do material e à agitação das partículas na passagem do pulso de compressão, respectivamente.

Desse modo, a energia transmitida à haste (W_t) pode ser definida conforme Eq. (19) denominada também como o método EFV, tendo em vista que o mesmo é determinado através de medições de força e de velocidade em uma seção no topo da haste do equipamento de sondagem. Além do método EFV, há os métodos EF2 e E2F para determinação da energia contida no pulso de compressão, conforme apresentadas nas Eq. (20) e Eq. (21), respectivamente.

$$EFV = \int_{t=0}^{t=máx} F(t) \cdot v(t) dt \quad (19)$$

$$EF2 = \frac{c}{E \cdot a} \cdot \int_{t=0}^{t(F=0)} F^2(t) dt \quad (20)$$

$$E2F = \frac{c}{E \cdot a} \cdot \int_{t=0}^{t=2l/c} F^2(t) dt \quad (21)$$

Onde: F – força seccional no topo da haste; v – velocidade das partículas; c – velocidade teórica de propagação da onda nas hastes; E – módulo de elasticidade do aço; a – área da seção transversal de controle; l – distância entre seção instrumentada e amostrador.

A literatura apresenta algumas expressões para a estimativa da energia transmitida (E_t), dentre as quais, os estudos de Fairhurst (1961) e De Mello (1971) com a teoria newtoniana aplicada ao SPT e Yokel (1982). A teoria newtoniana aplicada ao SPT consiste no estudo de colisões entre corpos rígidos, podendo ser expressa conforme Eq. (22) (MELLO, 1971). Yokel (1982), por sua vez, descreve a eficiência da energia transferida às hastes em relação à energia potencial teórica disponível no instante do impacto, conforme Eq. (23).

$$E_t = (e' \cdot W_m \cdot H) \cdot (1 + \lambda)^2 \cdot \frac{W_m \cdot W_p}{(W_m + W_p)^2} \quad (22)$$

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{4 M_h}{M_m}\right) \quad (23)$$

Onde: E_t – energia transmitida pelo pulso de compressão; e' – eficiência do martelo; W_m – Peso do martelo; H – altura de queda; λ – coeficiente de restituição; W_p – Peso do conjunto haste e amostrador; η – eficiência da energia transferida às hastes de Yokel (1982); M_h – massa das hastes; M_m – massa do martelo.

A energia transferida às hastes varia amplamente em distintos furos de sondagem, podendo a variabilidade ser explicada devido a fatores humanos, de equipamento ou de procedimento. Dessa forma, é possível obter a eficiência (e) da sondagem SPT através da razão entre a energia medida (E_i) e a energia teórica (E_t), conforme Eq. (24). Nos Estados Unidos muitas correlações empíricas foram baseadas para um nível de eficiência de 60%, enquanto no Brasil, segundo Cavalcante (2002), os valores de eficiência de sondagens SPT são de

aproximadamente 83%. A Eq. (25) mostra o cálculo para correção do N_{SPT} para a eficiência de 70%. Cabe salientar que a energia adotada no Brasil, devido à normatização do ensaio no país, é comumente sugerida a utilizar um nível de eficiência padrão de 70% para correção dos valores de N_{SPT} , valor este designado em conformidade com Cavalcante (2002).

$$e = E_i/E_t \quad (24)$$

$$N_{70} \cdot E_{70} = N_{SPT} \cdot E_i \quad (25)$$

Onde: e – eficiência da sondagem SPT; E_i – energia medida; E_t – energia teórica; N_{70} – correção do N_{SPT} para eficiência de 70%; E_{70} – energia teórica para eficiência de 70%.

3 Metodologia, locais de estudos e dados coletados

A metodologia adotada neste trabalho baseou-se na execução das seguintes etapas: definição dos locais do estudo, coleta dos dados necessários ao trabalho e previsões da capacidade de carga e dos recalques das estacas através de métodos semiempíricos, considerando e não considerando a correção da eficiência das sondagens à percussão (SPT). As previsões foram, então, avaliadas com base nos resultados experimentais obtidos a partir dos resultados das provas de carga.

Para tanto, foram coletados resultados de 7 provas de carga estáticas (PCE) à compressão e de 6 sondagens à percussão (SPT), cedidos e fornecidos por empresas de investigação geotécnica. As provas de carga estáticas à compressão foram desenvolvidas em estacas pré-moldadas de concreto e cravadas à percussão por meio de queda livre de martelo. Esses dados ensaiados foram obtidos de 4 obras distintas, 3 delas localizadas na cidade de Fortaleza e a outra na cidade de Eusébio, pertencente à Região Metropolitana de Fortaleza (RMF).

A Tabela (1) mostra resumidamente as características geométricas das estacas utilizadas nesta pesquisa e a numeração adotada para os ensaios de campo.

Tabela 1 – Geometria das estacas e numeração de ensaios

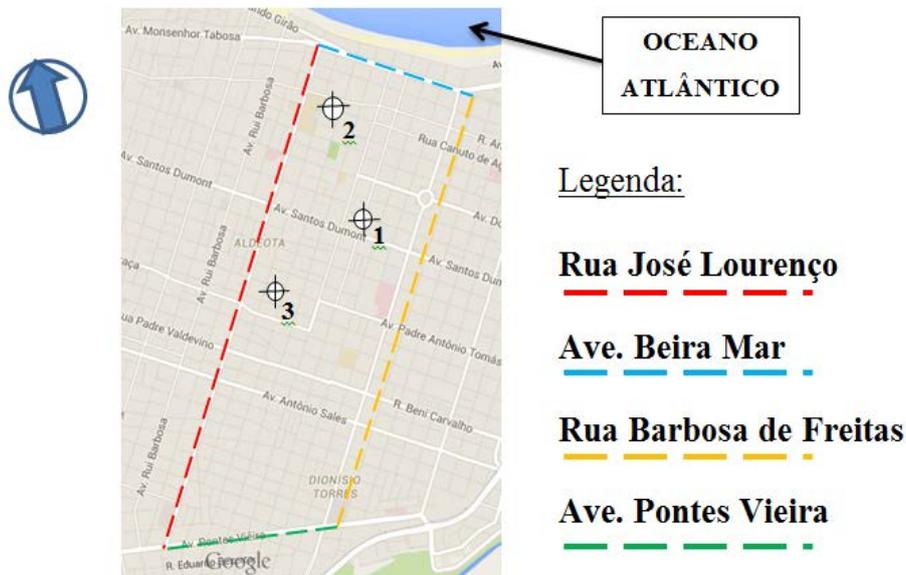
| Estaca | Seção transversal (cm x cm) | Comprimento de cravação (cm) | PCE nº | SPT nº | Grupo |
|--------|-----------------------------|------------------------------|--------|--------|----------|
| 01 | 30 x 30 | 700 | 01 | 01 | Grupo I |
| 02 | 30 x 30 | 750 | 02 | 02 | |
| 03 | 30 x 30 | 390 | 03 | 03 | |
| 04 | 25 x 25 | 1010 | 04 | 04 | Grupo II |
| 05 | 25 x 25 | 750 | 05 | 05 | |
| 06 | 25 x 25 | 760 | 06 | 06 | |
| 07 | 20 x 20 | 780 | 07 | 07 | |

Fonte: Elaboração própria.

A locação das sondagens e provas de carga pertencentes ao Grupo I (Estacas 01, 02 e 03) se limitaram a uma

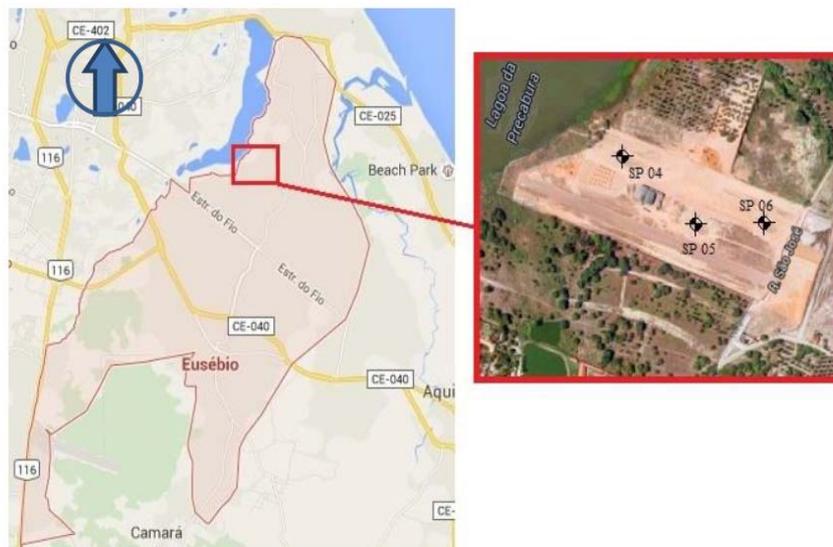
área de aproximadamente 6 km², abrangendo parcialmente os bairros Aldeota e Meireles da cidade de Fortaleza, com cada estaca associada a uma obra diferente. Enquanto os dados relacionados às demais estacas (estacas 04, 05, 06 e 07) se localizam no Polo Industrial e Tecnológico da Saúde, no município de Eusébio, estando todas associadas a um canteiro de obras de uma fundação de pesquisa na área da saúde. As Figuras 1 e 2 mostram a localização das sondagens dos locais na cidade de Fortaleza e no município de Eusébio, respectivamente. As distâncias entre sondagens nos Grupos 1 e 2 são de, no máximo, 1,2 km e 0,5 km, respectivamente.

Figura 1 – Planta de localização das sondagens SP 01, SP 02 e SP 03



Fonte: Elaboração própria.

Figura 2 – Planta de localização das sondagens SP 04, SP 05 e SP 06



Fonte: Elaboração própria.

3.1 Sondagens à percussão (SPT)

A Figura 3 evidencia os valores de índice de penetração do solo (N_{SPT}), a partir do referencial da superfície do terreno (e não em termos de cotas), para as sondagens relativas às obras situadas na cidade de Fortaleza (Grupo I), nomeadamente SP 01, SP 02 e SP 03.

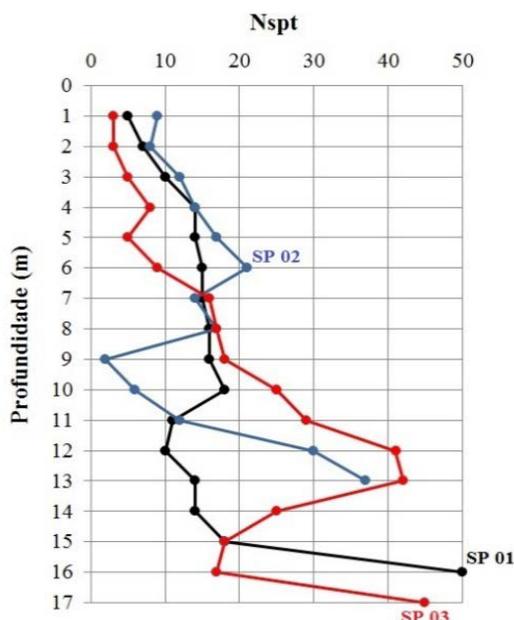
No caso da sondagem SP 01, apresentada na Figura 3 na cor preta, observa-se que há a existência de uma camada inicial de areia fina e média consideravelmente espessa, alcançando profundidades de até 10,35 metros. Em seguida, foi constatada a presença de material areno-siltoso de espessura de aproximadamente 5 metros, alcançando profundidades de até 16 metros. Foi encontrando o nível da água a uma profundidade de 15 metros, situada próxima da base da camada de areia siltosa.

Quanto ao resultado da sondagem SP 02, citada na Figura 3 na linha de coloração azul escura, foi registrada inicialmente uma camada de areia fina e média, com compacidade variável – podendo ser observada devido a

notável variação do resultado de N_{SPT} – observada até profundidade de 5,60 metros. Logo abaixo, foi encontrada uma areia argilosa de espessura próxima de 7 metros, alcançando cotas até 13 metros, sendo determinada por análise tátil visual com cor variegada e também possui compacidades variadas, também observável após aferição dos resultados de N_{SPT} . O nível freático foi encontrado a uma profundidade de 6,9 metros.

Por fim, a sondagem SP 03, expressa na Figura 3 pela linha vermelha, apresenta uma curta camada de areia fina e fofa de breves 65 centímetros. Logo após, observa-se uma espessa camada de areia fina a média que prossegue até profundidades de 15 metros. Os 2 metros restantes da sondagem foram classificados como argila arenosa, de consistência rija a dura, finalizando em profundidades de 17 metros. Nesta sondagem, o nível da água não foi identificado.

Figura 3 – Índices de penetração (N_{SPT}) obtidos para as sondagens SP 01, SP 02 e SP 03



Fonte: Elaboração própria.

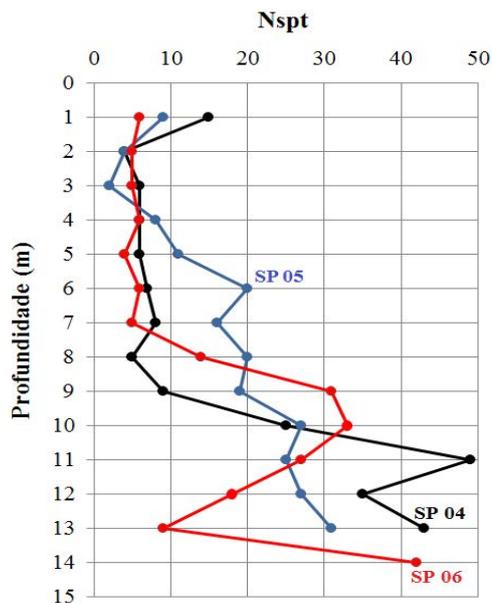
Para os demais resultados de sondagem, todas localizadas na obra situada em Eusébio, a Figura 4 mostra os valores de índice de penetração do solo (N_{SPT}), a partir do primeiro metro válido de sondagem, para as sondagens SP 04, SP 05 e SP 06, não levando em consideração o referencial em termos de cotas do terreno.

O subsolo proveniente da sondagem SP 04, evidenciado na Figura 4 pela cor preta, delimita uma camada superficial de 65 cm de mistura de materiais siltoso e arenoso, não podendo ser visto o N_{SPT} da camada por ser bastante próxima da superfície. Logo abaixo, foi constatada camada de silte, com pouca presença de finos, de consistência mole a média e cor variegada, atingindo cotas de profundidades de até 8,75 metros. Em seguida, foram classificadas breves camadas de siltes argilosos com consistência mais rija, até profundidades de 16 metros, totalizando espessura conjunta de cerca de 7 metros de silte. O nível freático encontra-se a 7,52 m de profundidade.

Quanto à sondagem SP 05, vista na cor azul escura na Figura 4, obteve-se uma breve camada de superfície de 20 centímetros, novamente não constando no gráfico de N_{SPT} por ser muito próximo da superfície, seguida de camada espessa de silte com presença de finos argilosos, mole a média consistência, observado até cotas de 5,85 metros de profundidade. Adiante, há a existência de camadas de siltes argilosos, com variação de cor e de consistência – evidenciadas pela inconsistência do índice de penetração, até profundidade máxima de 14 metros. O nível freático foi encontrado a 7,78 metros.

Para o caso da sondagem SP 06, vista na Figura pela cor vermelha, inicia-se com uma camada de areia fina siltosa de 87 centímetros. Em seguida, uma espessa camada de silte pouco argiloso, cuja compacidade varia em função da profundidade, mole a duro, chegando até a profundidade de 8,85 m. Logo após, encontram-se camadas constituídas por silte argiloso, rijo e duro, com variação de cor e pequenas diferenças nos valores de N_{SPT} . O nível da água encontra-se a 7,7 metros de profundidade.

Figura 4 – Índices de penetração (N_{SPT}) obtidos para as sondagens SP 04, SP 05 e SP 06

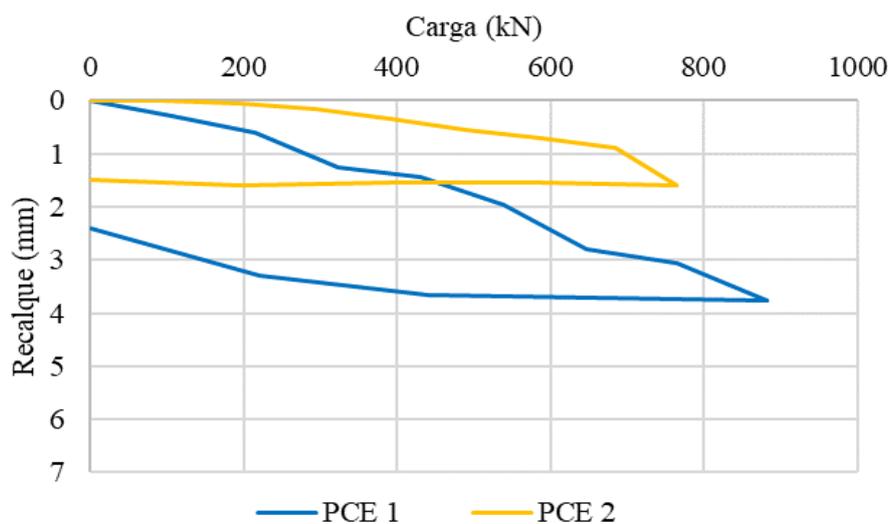


Fonte: Elaboração própria.

3.2 Provas de carga estáticas (PCE)

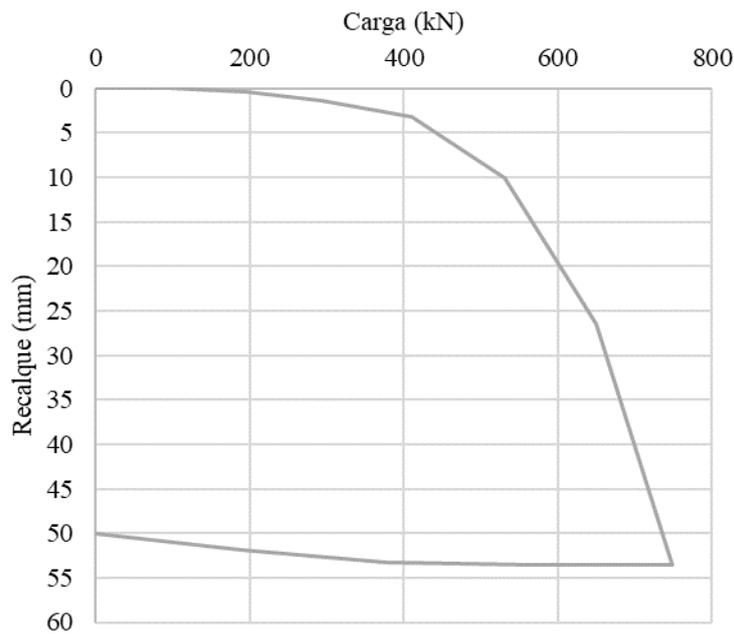
As provas de carga das Estacas 01 a 03 foram lentas, com aplicação de 7 ou 8 estágios de carregamento e 4 de descarregamento. Com leituras executadas pela aferição de 2 extensômetros apoiados no topo da estaca, o procedimento foi acompanhado até observação da estabilização dos recalques. Enquanto as provas de carga das 4 estacas restantes (Estacas 04 a 07) também foram lentas, com 8 a 10 estágios de carregamento e 5 de descarregamento. Não foram observadas rupturas nítidas do sistema solo-fundação nas provas de carga executadas, exceto na Estaca 03. As Figuras 5 a 7 apresentam as curvas carga-recalque obtidas dos ensaios de prova de carga.

Figura 5 – Curvas carga-recalque (PCE 1 e 2)



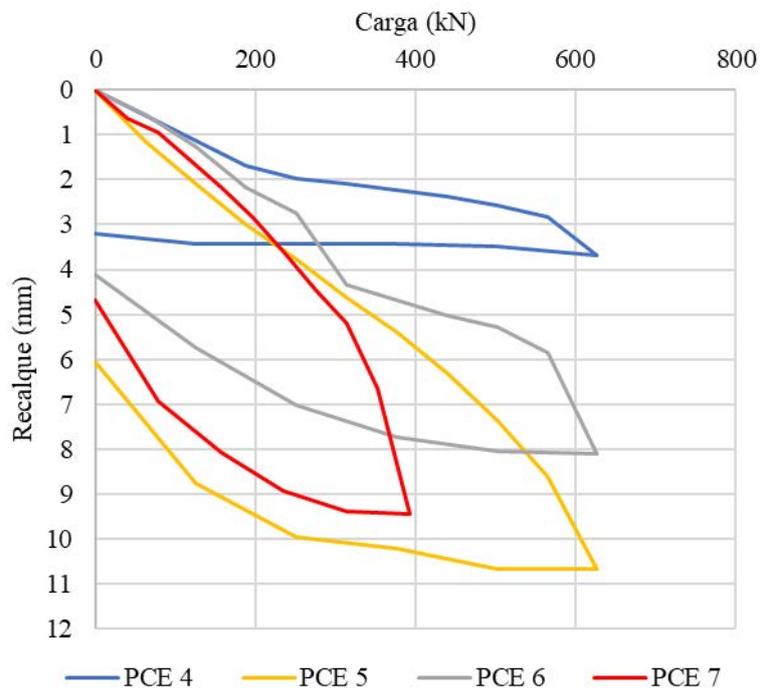
Fonte: Elaboração própria.

Figura 6 – Curva carga-recalque da PCE 3



Fonte: Elaboração própria.

Figura 7 – Curvas carga-recalque (PCE 4 a 7)



Fonte: Elaboração própria.

Os recalques medidos, experimentalmente para a carga definida em projeto, apresentaram valores em uma amplitude máxima de 0,40 a 4,63 milímetros. Percebe-se também resultados maiores para os casos do canteiro de obras no Eusébio, com relativa variação entre os resultados determinados nas Estacas 04 a 07. A Tabela (2) mostra os recalques medidos nas provas de carga estáticas (PCE) e as respectivas cargas de trabalho das estacas estudadas.

Tabela 2 – Recalques medidos e cargas de trabalho

| Estaca | Recalque medido (mm) | Carga de trabalho (kN) |
|--------|----------------------|------------------------|
| 01 | 1,5 | 448 |
| 02 | 0,4 | 388 |
| 03 | 2,62 | 378 |
| 04 | 2,09 | 319 |
| 05 | 4,63 | 319 |
| 06 | 4,34 | 319 |
| 07 | 2,8 | 200 |

Fonte: Elaboração própria.

4 Estimativa da eficiência das sondagens à percussão

A determinação da eficiência foi realizada a partir do monitoramento de três sondagens à percussão (SPT-01, SPT-02 e SPT-03), executadas pela mesma empresa e mesma equipe que executou as sondagens desta pesquisa. Tais sondagens foram realizadas no campo experimental da Universidade de Fortaleza (Unifor, conforme localização na Fig.8, situada na cidade de Fortaleza, Ceará.

Figura 8 – Localização do campo experimental



Fonte: Elaboração própria.

Objetivando identificar a eficiência das sondagens deste estudo (SP 01 a SP 06), foram realizadas estimativas da energia total transmitida (E_i) a partir da expressão da teoria newtoniana aplicada ao SPT conforme Mello (1971), cuja formulação, segundo Cavalcante (2002), é capaz de fornecer bons resultados quando se considera a hipótese do martelo rígido.

Para as estimativas da eficiência das sondagens realizadas, foram obtidas informações quanto à caracterização dos componentes dos equipamentos utilizados e dos procedimentos adotados. As informações coletadas sobre o equipamento de sondagem foram as seguintes: tipo de amostrador, tipo de martelo, tipo de corda/cabo, peso do martelo, peso do amostrador, peso das hastes e peso das luvas. Já com relação ao procedimento, as informações coletadas foram: altura de queda dos golpes (analisado por videomonitoramento), como o peso é solto, diâmetro do furo, utilização de revestimento e utilização de coxim. Além disso, adotou-se uma eficiência do martelo de 100% e coeficiente de restituição de 1 para emprego do método de Mello (1971).

A Tabela (3) apresenta um resumo das informações obtidas quanto aos componentes do equipamento e procedimentos, exceto altura de queda.

Tabela 3 – Características do equipamento e procedimentos das sondagens

| Elemento | Característica | Observação |
|----------------------------|----------------|--------------------------|
| Amostrador | Padrão | L=80 cm e Ø=10 mm (3/8") |
| Tipo de martelo | Maciço | - |
| Cabo ou corda | Corda | Corda com bom estado |
| Peso do martelo | 67,2 kg | - |
| Peso do amostrador | 6,15 kg | - |
| Peso das hastes | 3,01 kg/m | - |
| Peso das luvas | 0,25 kg | - |
| Peso da cabeça de bater | 0,948 kg | - |
| Como o peso é solto | Queda livre | - |
| Diâmetro do furo | 50 mm (2") | - |
| Utilização de revestimento | Sim | 64 mm (2.1/2") |
| Coxim de madeira | Não | - |

Fonte: Elaboração própria.

O monitoramento da altura de queda do peso foi efetuado a partir da determinação da posição do martelo durante seu processo de levantamento e soltura. Para isso, foi utilizado como referência um adesivo com uma escala em centímetros, com uma mudança de coloração exatamente onde o martelo atinge os 75 centímetros de altura para facilitar a visualização. O monitoramento foi aplicado apenas para as profundidades de 6, 7, 8 e 9 metros, exceto a sondagem SPT-01, a qual realizou-se as leituras apenas para a profundidade de 6 metros. A Tabela (4) mostra a média das eficiências obtidas por sondagem, observando que, em todas elas, as estimativas foram concordantes ao valor indicado por Cavalcante (2002) de 83%.

Tabela 4 – Médias das eficiências pelo método da teoria newtoniana

| Sondagem | Eficiência média (%) |
|----------|----------------------|
| SPT-01 | 84,4 |
| SPT-02 | 84,6 |
| SPT-03 | 86,4 |

Fonte: Elaboração própria.

Considerou-se, para o presente estudo, o valor médio de 85,1% como representativos da eficiência das sondagens. Nos Estados Unidos, grande parte das correlações empíricas foram estabelecidas a partir de uma eficiência de 60% para o cálculo do N_{SPT} , no entanto, no contexto brasileiro, decidiu-se utilizar um nível de eficiência padrão de 70% para correção dos valores de N_{SPT} , valor este designado em conformidade com Cavalcante (2002).

5 Resultados e Discussões

5.1 Estimativa da capacidade de carga

As estimativas de capacidade de carga foram realizadas através dos métodos de Aoki e Velloso (1975), Monteiro (1997), Decourt e Quaresma (1982) e Teixeira (1996) a partir dos resultados das sondagens à percussão (SPT) coletadas (Fig.3 e Fig.4). Para cada método, foram estimados dois valores de capacidade de carga, um valor denominado de $Q_{ult,70}$, baseado no valor de N_{SPT} corrigido para a eficiência de 70%, N_{70} , e outro valor baseado no valor sem correção, Q_{ult} .

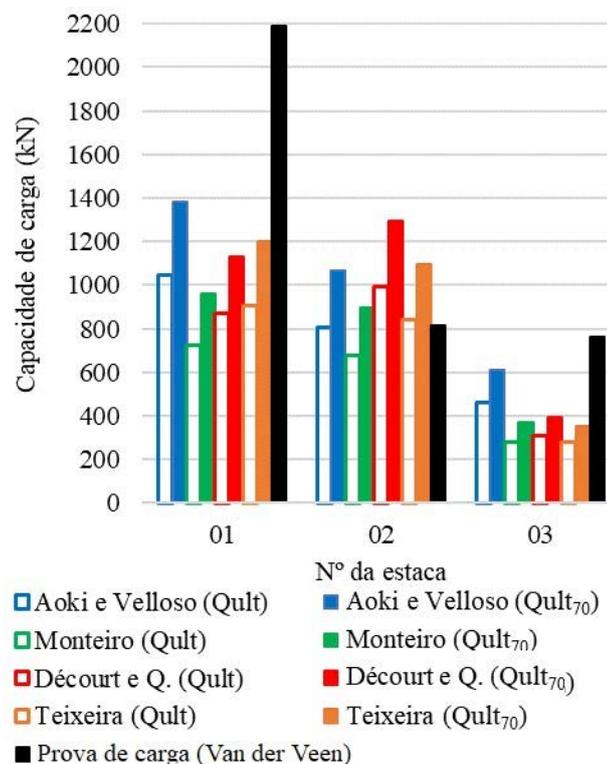
Além disso, para fins de comparação, foram determinados valores da capacidade de carga das estacas a partir das provas de carga. Para isso, utilizou-se o método de Van der Veen (1953) para todas as estacas, exceto para a Estaca 04 cujo método não apresentou aplicabilidade devido a forma acentuadamente linear da

curva. Nesta estaca, o método de Mazurkiewicz (1972) foi o utilizado. Além disso, utilizou-se os métodos da norma NBR 6122, Mazurkiewicz (1972) e Chin (1970) para a Estaca 03 e apenas para confirmação da carga de ruptura, já que esta estaca foi a única que apresentou ruptura.

Dessa forma, a Figura 9 mostra um gráfico comparativo das estimativas da capacidade de carga das estacas das obras da cidade de Fortaleza – Grupo I (Estacas 01, 02 e 03). Por essa figura observa-se, para as Estacas 01 e 03, tomando como referência o valor experimental obtido pela prova de carga, que todas as estimativas realizadas pelos métodos semiempíricos subestimaram os valores de capacidade de carga, e que as previsões a partir de N_{70} resultaram em valores de capacidade de carga mais elevados e, portanto, mais concordantes. Para a Estaca 01, o método de Aoki e Velloso (1975) apresentou a estimativa mais elevada da capacidade de carga e em relação ao valor experimental foi, portanto, o mais concordante.

Quanto à capacidade de carga sem correção da eficiência (Qult) da Estaca 02, a previsão mais concordante também foi obtida a partir do método de Aoki e Velloso (1975) com diferença de 1,4% (11,78 kN) em relação ao valor de referência, ou seja, experimental, já utilizando a correção do N_{SPT} pela eficiência, o método que resultou em maior convergência foi a proposta de Monteiro (1997), que apresentou diferença de 9,7% (79,06 kN) em relação ao valor de referência.

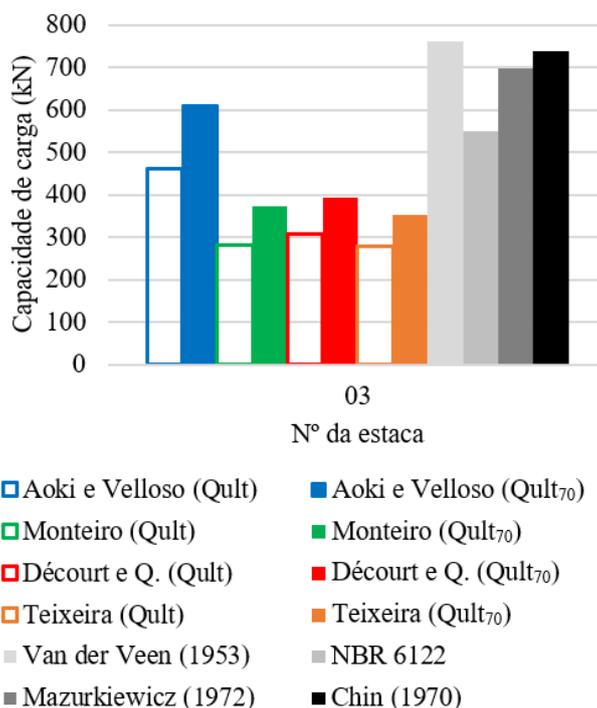
Figura 9 – Capacidade de carga das Estacas 01, 02 e 03



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 10 mostra os valores de capacidade de carga para a Estaca 03 pelos métodos semiempíricos utilizados e a partir da prova de carga. Observa-se que a solução de Chin (1970) e Mazurkiewicz (1972) convergiram com relação à solução de Van der Veen (1953), com diferenças percentuais de 3% e 8,4%, enquanto o método da NBR 6122 apresentou resultados inferiores das demais determinações baseadas na prova de carga.

Figura 10 – Capacidade de carga da Estaca 03



Fonte: Elaboração própria.

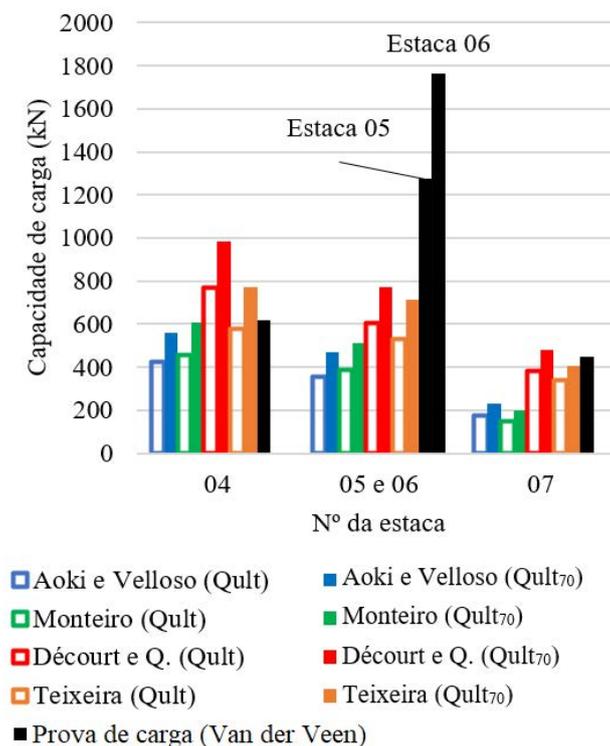
A Figura 11 mostra a comparação das estimativas da capacidade de carga das Estacas 04 a 07 a partir da utilização de métodos semiempíricos. Pela figura, observa-se que as previsões realizadas pelos métodos de Aoki e Velloso (1975) e Monteiro (1997) resultaram nas menores estimativas de capacidade de carga. Já os métodos de Décourt e Quaresma (1982) e Teixeira (1996) resultaram em valores convergentes entre si, principalmente nas Estacas 05, 06 e 07. Vale mencionar que todas as estimativas realizadas para as Estacas 05 e 06 foram inferiores aos valores experimentais e que a não utilização da correção da eficiência apresentou previsões mais divergentes aos valores de referência.

Quanto às previsões realizadas sem a correção do N_{SPT} , o método de Décourt e Quaresma (1982) apresentou estimativas mais convergente para as Estacas 05, 06 e 07 com diferenças absolutas de 668 kN, 1158 kN e 71 kN, respectivamente. Já o método Aoki e Velloso (1975) conduziu as estimativas mais discordantes em relação aos valores de referência.

Quanto às estimativas da capacidade de carga com correção da eficiência, na Estaca 04, a proposta de Monteiro (1997) apresentou capacidade de carga mais concordante em relação ao valor de referência, que nesta estaca foi obtida a partir de Mazurkiewicz (1972). Vale mencionar que, nessa estaca, os métodos de Décourt e Quaresma (1982) e Teixeira (1996), com correção da eficiência para 70%, superestimaram a capacidade de carga.

Para as Estacas 05, 06 e 07, as estimativas obtidas pelo método de Décourt e Quaresma (1982), com correção da eficiência para 70%, foi a mais concordante. Em relação aos valores experimentais, as diferenças foram de 501 kN, 991 kN e 32 kN, respectivamente.

Figura 11 – Capacidade de carga das Estacas 04 a 07



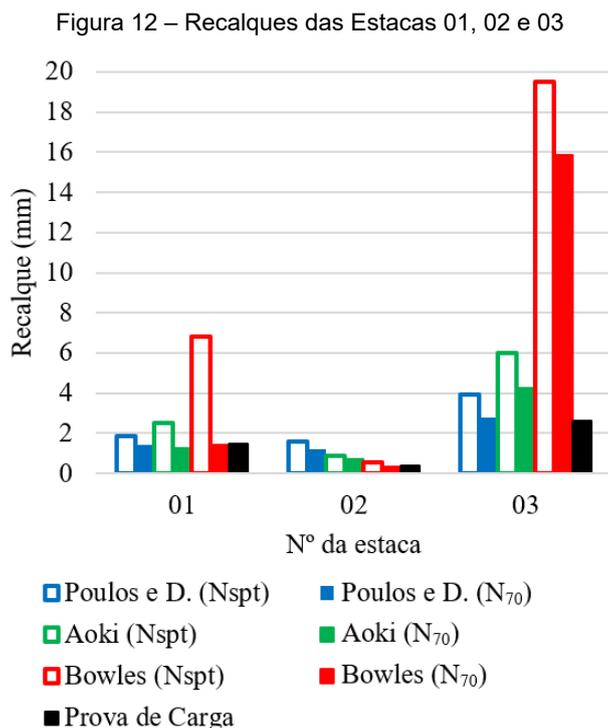
Fonte: Elaboração própria.

5.2 Estimativa dos recalques

Foram executadas previsões conforme os métodos apresentados no capítulo 2.2, a saber, os métodos de Poulos e Davis (1980), Aoki (1984) e Bowles (1997), utilizando valores corrigidos e não corrigidos do N_{SPT} em relação à eficiência das sondagens à percussão. As cargas de trabalho adotadas foram as já mencionadas na Tab. (2). Além disso, é importante frisar que os parâmetros de deformabilidade adotados foram determinados por meio de correlações sugeridas pela literatura, de acordo com cada um dos métodos utilizados, com os valores de índice de penetração do solo (N_{SPT}), que podem ser consultados nas Fig. 3 e Fig. 4.

Sendo assim, pode-se calcular os recalques pelas formulações e compará-las com os resultados obtidos pelas provas de carga executadas. A Figura 12 mostra um comparativo dos recalques previstos com os experimentais, com enfoque para as Estacas 01, 02 e 03 (Grupo I). Pela figura, confere-se que todas as estimativas utilizando N_{SPT} não corrigidos superestimaram os valores. Além disso, para as Estacas 01 e 03, observa-se que as previsões efetuadas sem correção do N_{SPT} conduziram a previsões divergentes pelos métodos de Poulos e Davis (1980) e Bowles (1997), comparados aos resultados medidos nas provas de carga. Ademais, os resultados de Poulos e Davis (1980) e Aoki (1984) convergiram entre si e divergiram de Bowles (1997). As estimativas obtidas por Bowles (1997) não apresentaram tendência em relação às medidas experimentais.

Quanto às estimativas de recalques efetuadas com correção da energia, ou seja, utilizando N_{70} , observa-se que, para todos os métodos e para as Estacas 01, 02 e 03, houve maior convergência entre os recalques estimados e os valores experimentais. Para as Estacas 01 e 02, as soluções baseadas no método de Bowles (1997) proporcionaram diferenças de 4% (0,06 mm) e 22,5% (0,09 mm), respectivamente, em relação aos valores medidos experimentalmente. Para a Estaca 03, o método de Poulos e Davis (1980), para N_{70} , apresentou o recalque mais concordante, com diferença de apenas 6% (0,15 mm) em relação ao valor experimental.



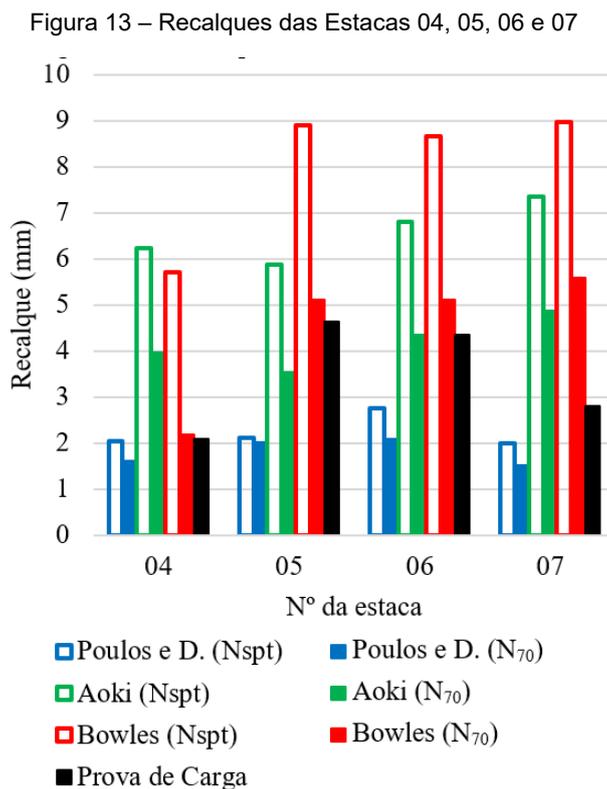
Fonte: Elaboração própria.

Quanto ao caso das Estacas 04 a 07, a Figura 13 expõe os recalques obtidos pelas provas de cargas estáticas e pelas formulações estudadas. Primeiramente, no que concerne às previsões sem correção de eficiência, foi observado que as estimativas realizadas por Poulos e Davis (1980) subestimaram os recalques e os métodos de Aoki (1984) e Bowles (1997) superestimaram as previsões de recalque para essas estacas.

Cabe citar que nos casos das Estacas 04, 06 e 07, sem a correção da eficiência, os métodos de Aoki (1984) e Bowles (1997) apresentaram convergência entre si dos recalques obtidos e divergentes em relação aos dados experimentais de prova de carga. Apesar disso, comparando os recalques obtidos pelo método de Poulos e Davis (1980) com os experimentais, foi constatado que nas Estacas 04 e 07 houve concordância entre os valores, com diferenças de 3% (0,06 mm) e 29% (0,81 mm), respectivamente. Acerca da Estaca 05, o método que melhor convergiu, quando comparando os resultados sem correção da eficiência, foi o de Aoki (1984), apresentando diferença de 27% (1,25 mm) em relação ao resultado de prova de carga.

Dentre os resultados mais destoantes desta série de 4 estacas (Grupo II), com exceção da Estaca 04, a proposta de Bowles (1997), sem a correção da eficiência, forneceu valores de recalques mais divergentes dos obtidos experimentalmente.

Comparando as estimativas por cada método, observa-se que a correção do valor de N_{SPT} para N_{70} conduziu à redução da diferença entre os valores estimados de recalque e os obtidos experimentalmente apenas nos métodos de Aoki (1984) e Bowles (1997). Quanto às estimativas de recalques considerando a correção da eficiência da sondagem, observa-se que o método de Bowles (1997) conduziu a resultados mais concordantes para as Estacas 04 e 05, e apresentou diferença de 0,78 mm para a Estaca 06. O método de Poulos e Davis (1980) proporcionou estimativa mais concordante apenas para a Estaca 07, e estimativas mais discordantes para as Estacas 05 e 06 com diferenças absolutas em relação aos recalques medidos de 2,62 mm e 2,26 mm, respectivamente.



Fonte: Elaboração própria.

6 Conclusões

De forma geral, a correção do N_{SPT} em função da eficiência promoveu, para todas as estacas e métodos utilizados, aumento da estimativa da capacidade de carga e redução dos recalques estimados.

Quanto à capacidade de carga das estacas, obteve-se que, para as Estacas 01, 05 e 06, todas as previsões realizadas apresentaram valores expressamente abaixo ao obtido por prova de carga, com diferenças percentuais superiores a 36%. O método de Monteiro (1997) apresenta concordância aos valores obtidos por Aoki e Velloso (1975) para a maioria das estacas, de igual modo, os métodos de Teixeira (1996) e Décourt e Quaresma (1982) convergem entre si para a maioria das estacas.

As estimativas efetuadas pelo método de Aoki e Velloso (1975) apresentaram maior concordância com as obtidas por provas de carga nas estacas do Grupo I, enquanto o método de Décourt e Quaresma (1982) apresentou maior convergência aos valores de referência de capacidade de carga para a maioria das estacas da obra situada no município de Eusébio (Grupo II).

No tocante aos recalques estimados sem correção da eficiência das sondagens SPT, foi analisado que as estimativas mais precisas, em sua maioria, com os valores experimentais foram obtidas pelo método de Poulos e Davis (1980), enquanto a formulação proposta por Bowles (1997) proporcionou maior divergência aos valores obtidos experimentalmente na maioria das estacas analisadas, superestimando os recalques. Para os recalques estimados a partir de valores do N_{SPT} corrigidos em função da eficiência da sondagem, o método de Bowles (1997) apresentou as estimativas mais concordantes, para a maioria das estacas. Por outro lado, o mesmo método conduziu aos recalques mais divergentes nas Estacas 03 e 07. O método de Aoki (1984), por sua vez, apresentou estimativas intermediárias quando comparadas com os métodos de Poulos e Davis (1980) e Bowles (1997) para a maioria das estacas.

De forma geral, tanto os recalques experimentais obtidos das provas de carga quanto as estimativas mais concordantes apresentaram concordância com relação às indicações de Décourt (1998) a qual afirma que recalques de estacas, para uma carga de cerca da metade da carga de ruptura, apresentam valores entre 2,0 e 6,0 milímetros.

Além disso, observou-se que a correção do N_{SPT} promoveu estimativas de capacidade de carga mais concordantes. Da mesma forma as estimativas, para N_{SPT} corrigidos em função da eficiência das sondagens, foram mais concordantes na previsão dos recalques.

Agradecimentos

Os autores agradecem as empresas Tecnord e Rochabrasil pelo fornecimento dos dados de investigação geotécnica, o POSDEHA pelo incentivo à pesquisa, à CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro.

Referências

- AGUIAR, M. F. P. *et al.* Análise da Eficiência da Determinação de Recalques em Fundações Profundas em Solos Silto-Arenosos de Fortaleza. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA*, 18., 2016, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte: ABMS, 2016, p. 1-9.
- ANTUNES, W. R.; CABRAL, D. A. **Capacidade de carga de estacas hélice contínua**. *In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA*, 3., 1996, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: SEFE, 1996, v. 2, p. 105-109.
- AOKI, N. **Previsão da curva carga-recalque**. Palestra proferida na Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos: USP, 1984.
- AOKI, N.; VELLOSO, D. A. An approximate method to estimate the bearing capacity of piles. *In: PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATIONS ENGINEERING*, 5., 1975, Buenos Aires. **Proceedings [...]**. Buenos Aires: Chilean Geotechnical Society, 1975, v. 1, p. 367-376.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- BEZERRA, P. H. L. *et al.* Settlement's Prediction of Piles in Tropical Soil. **Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA**, [s. l.], v. 52, n. 2, p. 48-55, jun. 2021.
- BOWLES, J. E. **Foundation Analysis and Design**. 5. ed. Singapura: McGraw-Hill Companies, Inc., 1997.
- CAVALCANTE, E. H. **Investigação Teórico Experimental sobre o SPT**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002, 410p.
- CHIN, F. K. Discussion: "Pile test. Arkansas River Project". **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, Virginia, v. 97, n. 6, p. 930-932, 1970. DOI: <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001623>.
- DECOURT, L.; QUARESMA, A. R. Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES*, 6., 1978, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ABMS, 1978, v. 1, p. 45-53.
- DÉCOURT, L.; QUARESMA, A. R. Como calcular (rapidamente) a capacidade de carga limite de uma estaca. **Revista Construção**, São Paulo, n. 1800, ago. 1982. /separata/, ed. Pini,
- DÉCOURT, L. Análise e projeto de fundações profundas: estacas. *In: HACHICH, W. et al. (eds.). Fundações: teoria e prática*. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. p. 265-301.
- FAIRHURST, C. Wave Mechanics of Percussive Drilling. **Mine & Quarry Engineering**, [s. l.], v. 27, n. 3, p. 122-130, 1961.
- MASSAD, F. Sobre a interpretação de provas de carga em estacas, considerando as cargas residuais na ponta e a reversão do atrito lateral. Parte I: solos relativamente homogêneos. **Revista Solos e Rochas**, São Paulo, v. 15, n. 2, p. 103-115, 1992.
- MAZURKIEWICZ, B. K. Test loading of piles according to Polisd regulations. Royal Swedish Academy of Engineering Sciences. Commission on Pile Research, **Preliminary Report** nº 35, p.20, Stockholm, 1972.

- MELLO, V. F. B. de. The Standard Penetration Test. *In: PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING*, 4., 1971, Porto Rico. **Proceedings** [...]. Porto Rico: ASCE, 1971, v. 1.p.1-86.
- MONTEIRO, P. F. **Capacidade de carga de estacas** - método Aoki-Velloso. Relatório interno de Estacas Franki Ltda. Rio de Janeiro, 1997.
- MOURA, A. S.; NÓBREGA JÚNIOR, A. J.; AGUIAR, M. F. P. Análise de métodos semi-empíricos para o cálculo da capacidade de carga de estacas raiz de pequeno e grande diâmetro em obras de Fortaleza. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, v. 32, n. 1, p. 56-72, jun. 2011.
- POULOS, H. G.; DAVIS, E. H. **Pile foundation analysis and design**. New York: John Wiley & Sons, 1980. 397p.
- SALIONI, C. Capacidade de carga de estacas injetadas. Separata de: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA, 1985, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo: ABEF/ABMS, 1985, v. 1, p. 13-27.
- SOUSA, T. C. *et al.* Análise de métodos semi-empíricos para o cálculo da capacidade de carga de estacas hélice contínua monitorada em obras de Fortaleza. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA*, 19., 2018, Salvador. **Anais** [...]. Salvador: ABMS, 2018, p. 1-10.
- TEIXEIRA, A. H. Projeto e execução de fundações. *In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA*, 3., 1996, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo: ABEF/ABMS, 1996, p. 33-50.
- VAN DER VEEN, C. The Bearing Capacity of a Pile. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING*, 3., 1953, Zurich. **Proceedings** [...]. Zurich: ICSMFE, 1953, v. 2, p. 84-90.
- VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 568p.
- YOKEL, F. Y. Energy Transfer Mechanism in SPT. **Journal of Geotechnical Engineering**, Virginia, v. 115, n. 9, p. 1331-1336, 1982.

Sobre os autores

Yan Carlos Chiu Rodriguez

Possui graduação em engenharia civil pelo Instituto Superior Politécnico Jose Antonio Echeverria (2008) e mestrado em geotecnia pela Universidade Federal do Ceará (2015).

Alfran Sampaio Moura

Possui graduação em engenharia civil pela Universidade Federal do Ceará (1994), licenciatura plena em disciplinas específicas (Física) pela Universidade Estadual do Ceará (2000), especialização em engenharia rodoviária pela UFC (1999) e mestrado (1997) e doutorado (2007), em engenharia civil – geotecnia, pela Universidade de Brasília (UnB). Atualmente é professor da Universidade Federal do Ceará (UFC), lecionado nos cursos de graduação em engenharia civil e engenharia ambiental e no mestrado em geotecnia da mesma universidade. Atualmente tem atuado, principalmente, nos seguintes temas: fundações, investigação geotécnica, mecânica dos solos e geotecnia ambiental.

Danton França da Silva

Possui graduação em engenharia civil (Magna Cum Laude) pela Universidade Federal do Ceará (2020) e mestrado em Geotecnia no Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA) da Universidade Federal do Ceará.

Lucas Pereira Cavalcante

Possui graduação em engenharia civil pela Universidade de Fortaleza (2019), com mestrado de Geotecnia em andamento no Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA) da Universidade Federal do Ceará.

Avaliado em: 06.03.2023

Aceito em: 06.10.2023