

Estacas pré-fabricadas executadas em Ponta Grossa (PR): análise de métodos de dimensionamento através de ensaios de carregamento dinâmico

Eng. Matheus Wesley Andrade Moreira

Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Brasil, matheuswesley5@gmail.com

MSc. Bianca Penteado de Almeida Tonus

Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Brasil, bpatonus@uepg.br

Dr. Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschläger

Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Brasil, cerlautenschlager@uepg.br

RESUMO: O uso de metodologias semiempíricas no cálculo da capacidade de carga de fundações profundas é amplamente difundido. No entanto, é sabido que estes métodos carregam especificidades que não permitem sua aplicação indistinta a todos os tipos de solo, dado que as condições de formação dos maciços são específicas. Nesta perspectiva, este trabalho buscou analisar a aplicabilidade dos métodos semiempíricos de Décourt-Quaresma (1978), Aoki-Velloso (1975), Lobo (2005) e Vorcario-Velloso (GOMES, 2000) quando utilizados no dimensionamento de fundações profundas em solos da cidade de Ponta Grossa, no Paraná. Os dados disponíveis são referentes a estacas pré-fabricadas de concreto de seção transversal quadrada e hexagonal. Como referencial da capacidade de carga foram utilizados resultados de ensaios de carregamento dinâmico, ECD, realizados em estacas de 4 obras na cidade. Na região são observados solos sedimentares da Formação Ponta Grossa e do Grupo Itararé, que são comumente argilosos. As principais conclusões confirmam que o ensaio SPT não tem aplicabilidade satisfatória em solos moles para fins de dimensionamento e que os resultados obtidos sinalizam a necessidade de calibração dos métodos de dimensionamento com base nas condições geotécnicas da região. No entanto, diferentes métodos podem ser recomendados no contexto geotécnico local, desde que observado o perfil típico do subsolo, já que o comportamento das previsões não se mostra exclusivamente dependente da resistência à penetração.

PALAVRAS-CHAVE: métodos semiempíricos; fundações profundas; ensaio de carregamento dinâmico; formação Ponta Grossa.

1 INTRODUÇÃO

As fundações de uma edificação são elementos estruturais que devem ser analisados em conjunto com o solo da região onde serão implantadas. Esta análise constitui o sistema solo-estaca, o qual detém características próprias que dependem da geotecnia da região.

Os métodos semiempíricos de dimensionamento de estacas são formulados com base em observações práticas e, portanto, carregam consigo as influências da região de origem. Desta forma, sua aplicação indistinta sob outras condições pode não ser condizente com a real capacidade resistente do solo.

A instrumentação de estacas torna viável o conhecimento acerca do comportamento do elemento de fundação, e representa um passo importante para a aplicação do ensaio de carregamento dinâmico (ECD). As informações obtidas por este ensaio são tais que permitem uma análise da estaca levando-se em conta as condições reais existentes no solo onde foi executada, sendo importante para procedimentos de calibração de métodos semiempíricos de dimensionamento e, também, para o controle de qualidade das cravações de estacas pré-moldadas.

Este trabalho buscou verificar a aplicabilidade de métodos semiempíricos de dimensionamento de fundações profundas no que diz respeito à previsão

da capacidade de carga de estacas pré-fabricadas de concreto na região de Ponta Grossa, no Paraná.

Para isso, foram analisados os resultados de 58 laudos de ECD de 4 obras da região, comparando-os com as previsões da capacidade de carga obtidas pelos métodos de Décourt-Quaresma (1978), Aoki-Velloso (1975), Lobo (2005) e Vorcaro-Velloso (GOMES, 2000). Os resultados obtidos sinalizam a necessidade da calibração dos métodos de dimensionamento com base nas condições geotécnicas da região.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A cidade de Ponta Grossa, localizada no interior do Paraná, assenta-se sobre o Segundo Planalto Paranaense. Pode-se dizer que as rochas da região são pertencentes aos sedimentos das formações Ponta Grossa e Furnas e do Grupo Itararé (IPLAN, 2006).

A formação Ponta Grossa apresenta predominância de sedimentos de fina granulação, em especial os folhelhos argilosos, siltico-argilosos e silticos (MELO et al., 2003). A Formação Furnas é composta por arenitos quartzosos, de granulação média a grossa, e feldspáticos ou caulínicos. As rochas do Grupo Itararé são comumente os siltitos, folhelhos e arenitos, dentre outros (IPLAN, 2006).

Sá (2010) afirma que uma parcela relevante dos solos da região é proveniente de folhelhos e argilitos, culminando em solos argilosos e muito argilosos. Além disso, o contexto histórico local do intemperismo e transporte de partículas mostra-se como responsável pela grande quantidade de solos com textura média e argilosa.

As estacas pré-moldadas de concreto são largamente utilizadas em obras na região. Simons e Menzies (1981) afirmam que a execução de estacas pré-moldadas não depende do nível de água do lençol freático e pode ser viável mesmo em grandes profundidades. Além disso, se mantêm estáveis em solos compressíveis, tais como espessas camadas de argila mole. Em contrapartida, deve-se levar em conta a possibilidade de danos ao elemento de fundação durante sua cravação, bem como o excesso de ruído e vibração, como possíveis desvantagens.

O sistema solo-estaca formado por estes elementos precisa ser dimensionado para que a edificação apresente a estabilidade e segurança necessárias. Dentre os métodos de dimensionamento disponíveis, destacam-se aqueles que dependem de informações do ensaio de resistência à penetração, SPT, abordado na norma NBR 6484 (ABNT, 2020).

Este ensaio busca avaliar a resistência do solo com base na dificuldade para a cravação do amostrador

padrão. Esta cravação é feita por um martelo de 65 kg que, suspenso por um sistema de tripé, é solto de uma altura de 75 cm, caracterizando-se como um golpe do martelo. A cada metro de profundidade são contabilizados o número de golpes necessários para a penetração do amostrador, contados a cada 15 cm e em três sequências, o que totaliza 45 cm. Com isso, define-se que o Índice de Resistência à Penetração N_{SPT} é a soma do número de golpes necessários para a penetração dos 30 cm finais do amostrador. Desta forma, o número de golpes consegue representar, mesmo que indiretamente, a resistência do substrato.

Este ensaio é de ampla utilização no Brasil devido à sua simplicidade e baixo custo, mas, em contrapartida, os resultados obtidos são pontuais e estão sujeitos a erros humanos durante a execução (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012). É necessário abordar o controle da qualidade do estaqueamento e, neste sentido, o ensaio de carregamento dinâmico mostra-se como uma importante ferramenta para avaliar o comportamento de fundações profundas com maior assertividade.

O ECD é capaz de promover um complemento ao controle de qualidade do estaqueamento em conjunto com provas de carga estática. Niyama, Aoki e Chamecki (1998) o definem como aquele onde é aplicado sobre o elemento de fundação em análise um carregamento axial dinâmico onde, a partir de instrumentação instalada na estaca, torna-se possível obter informações sobre a capacidade de carga do elemento com base na teoria da equação de onda. No Brasil, os procedimentos do ensaio são normalizados pela NBR 13208 (ABNT, 2007).

Segundo Alonso (2011), o controle de estacas por instrumentação se dá pelo acoplamento de extensômetros e de acelerômetros ao corpo da estaca, ambos aos pares e diametralmente opostos para compensar efeitos advindos da excentricidade do golpe do martelo sobre a estaca. Os acelerômetros monitoram a velocidade e o deslocamento, ao passo que os extensômetros medem deformações. A partir da área da seção transversal e do módulo de elasticidade da estaca torna-se possível obter a magnitude das forças envolvidas no processo, conforme indicam Velloso e Lopes (2010).

Os dados coletados por estes sensores são analisados em circuitos eletrônicos capazes de realizar diversos cálculos para cada golpe aplicado ao elemento de fundação. A aceleração e a deformação específica atuam como dados de entrada e, após o processamento, são obtidos sinais de força e velocidade (ALONSO, 2011). Os cálculos são realizados lançando-se mão da teoria de propagação de ondas, fornecendo valores que refletem a força máxima no impacto (FMX), a energia máxima no

golpe (EMX), a resistência estática mobilizada (RMX) e o deslocamento máximo da estaca causado pelo impacto (DMX), bem como informações sobre a integridade do elemento de fundação, a eficiência do sistema de cravação e as tensões observadas na estaca (TSUHA; AOKI; CINTRA, 2013).

Estes autores ainda afirmam que, como vantagens do ensaio de carregamento dinâmico, podem ser citados o menor custo e menor tempo dispendido (quando comparado às provas de carga estática), o que interfere diretamente na quantidade de estacas ensaiadas. Também deve-se notar o fato de que o valor da capacidade de carga pode ser obtido durante o próprio processo de cravação e, além disso, o ensaio permite que sejam avaliadas separadamente a magnitude das resistências lateral e de ponta, bem como permite uma análise da integridade da estaca ao longo do fuste.

3 METODOLOGIA

Foram analisados 58 laudos de ECD executados em estacas pré-moldadas de concreto de 4 obras diferentes na cidade, tendo sido todas elas cravadas em solos da Formação Ponta Grossa. As estacas têm comprimento entre 7 e 30 m, e foram cravadas em regiões com solo predominantemente do tipo argila, mas apresentando também siltes arenosos e argilosos.

As obras são referentes a edificações de 2 a 16 pisos, sendo a maioria de 4 pavimentos: na obra A, estão presentes 16 pisos de apartamentos residenciais; na B, com usos industriais, existem 2; e em C e D, cujo uso é residencial, 4 pavimentos. O perfil de solo apresenta-se relativamente homogêneo entre os diversos furos de sondagem realizados em cada obra, tornando viável a análise das estacas separadas pela própria obra a que pertencem. Considera-se baixo o N_{SPT} menor ou igual a 4 golpes.

Os métodos semiempíricos de dimensionamento que foram analisados são Décourt-Quaresma (1978), Aoki-Velloso (1975), Lobo (2005) e Vorcaro-Velloso (GOMES, 2000).

Os dados foram organizados em planilhas separadas para cada método, e os cálculos foram realizados de forma a permitir uma apreciação do desenvolvimento da resistência de ponta e por atrito lateral ao longo do perfil do solo. Os valores estimados para a capacidade de carga total foram comparados com os laudos de ECD, para cada estaca, a partir da análise da relação $Q_{ESTIMADO}/Q_{ECD}$. Desta forma, quanto mais próxima de 1 for esta relação, mais assertiva é a previsão da capacidade de carga. Houve análise do erro médio absoluto, comparando-se o módulo da diferença entre os valores estimados

e aqueles observados em campo. A análise dos valores de $Q_{ESTIMADO}/Q_{ECD}$ também permitiu que fossem calculados os coeficientes de dispersão das séries de dados.

4 RESULTADOS

A análise dos resultados realiza-se de forma individualizada sobre as estacas de cada obra. Desta forma podem ser consideradas condicionantes específicas relacionadas ao perfil de solo em questão.

O perfil geotécnico da obra A apresenta camadas de argila mole com baixa resistência à penetração até por volta dos 5 m de profundidade, onde observa-se um aumento gradativo da resistência que atinge 50 golpes na cota próxima aos 10 m. O solo segue sendo argila de difícil penetração por mais 10 m, apontando, em alguns casos, $N_{SPT} > 50$ golpes. As estacas têm seção transversal quadrada com dimensões entre 25 e 40 cm, com profundidades entre 8 e 11 m. Na Figura 1 indica-se o perfil geotécnico da obra A. As estimativas da capacidade de carga total para as estacas desta obra são indicadas no gráfico da Figura 2, bem como os valores obtidos a partir dos ensaios de carregamento dinâmico.

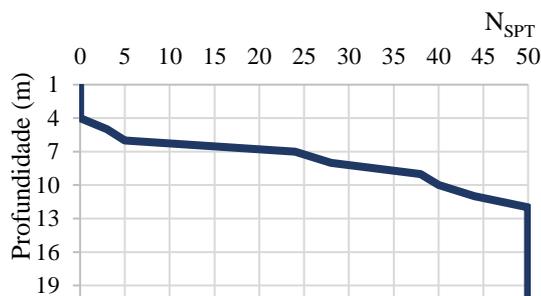


Figura 1. Perfil geotécnico típico da obra A.

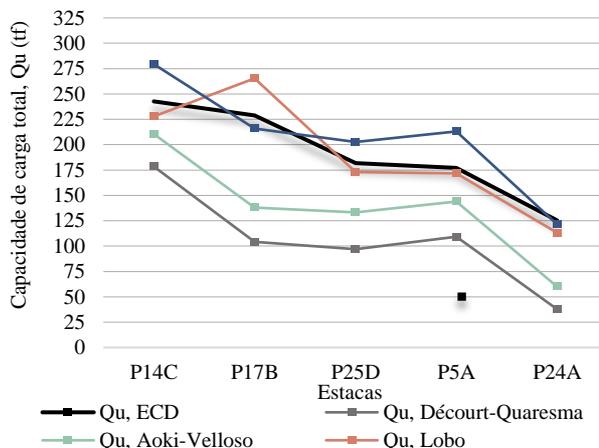


Figura 2. Estimativas da capacidade de carga total por métodos semiempíricos para as estacas da obra A.

Embora tenha estimado, em um dos casos, um valor superior ao obtido em campo, o método de Lobo é o que tem a melhor aderência ao comportamento das estacas da obra A. Neste caso, a média da razão entre estimativa e valor de referência é $Q_{\text{LOBO}}/Q_{\text{ECD}} = 98,4 \pm 10,1\%$, com coeficiente de variação de 10,2%. O cálculo $Q_{\text{DQ}}/Q_{\text{ECD}}$ e $Q_{\text{AV}}/Q_{\text{ECD}}$ atinge, respectivamente, $52,8 \pm 14,7\%$ e $69,9 \pm 15,9\%$. Além disso, para estes métodos, a homogeneidade das estimativas é menor quando comparada ao método de Lobo, atingindo coeficiente de variação de 27,8% para Décourt-Quaresma e de 22,7% para Aoki-Velloso.

A metodologia proposta por Vorcaro-Velloso tende a apresentar resultados superiores aos obtidos em campo. No entanto, quando analisados os coeficientes estatísticos de dispersão, nota-se proporcionalidade aos valores de referência. O método tem desvio padrão de 11,5% e coeficiente de variação de 10,6%, estimando a capacidade de carga em 107,6% do que se indica pelos ensaios de carregamento dinâmico.

Os métodos de Décourt-Quaresma e Aoki-Velloso apresentam relativa proporcionalidade aos valores de referência, apesar de as estimativas se darem com erros não desprezíveis. Neste sentido, um ajuste dos coeficientes para argilas da formação Ponta Grossa pode aumentar a aderência dos cálculos das metodologias aos sistemas solo-estaca locais, aumentando a acurácia das estimativas.

A obra B se caracteriza por perfil geotécnico deveras semelhante ao da obra A, sendo marcado pela ocorrência de argila ao longo de toda a profundidade da sondagem. São observados N_{SPT} de aproximadamente 7 golpes nas primeiras camadas e igual a 50 golpes por volta de 10 m. A partir daí, ocorrem camadas de argila rija com $N_{\text{SPT}} \geq 50$ golpes, mostrando-se impenetrável aos 18 m.

As estacas têm seção transversal quadrada, com dimensões que variam entre 18 e 25 cm, e as suas profundidades situam-se entre 8 e 11 m. Na Figura 3 indica-se o perfil geotécnico da obra B. O gráfico da Figura 4 relaciona os valores da capacidade de carga total estimados pelos métodos semiempíricos em análise aos valores de referência observados em campo a partir do ensaio de carregamento dinâmico.

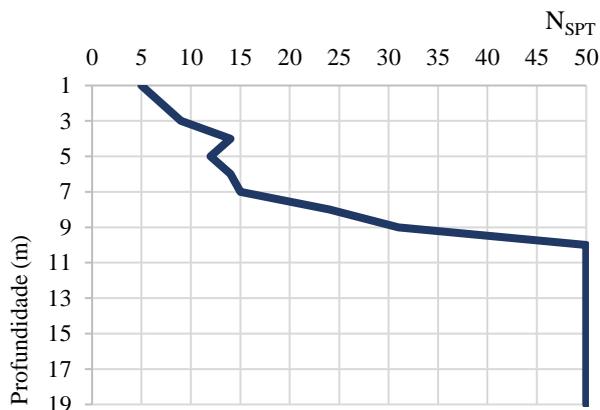


Figura 3. Perfil geotécnico típico da obra B.

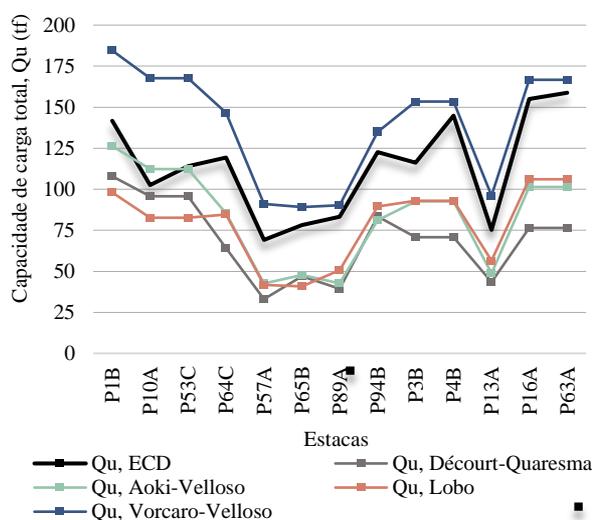


Figura 4. Estimativas da capacidade de carga total por métodos semiempíricos para as estacas da obra B.

O método de Lobo é o que apresenta maior homogeneidade em relação às estimativas da capacidade de carga total, sendo isso refletido pelo valor médio da razão $Q_{\text{LOBO}}/Q_{\text{ECD}}$, igual a 68,8%. Embora este seja um valor que indica conservadorismo, é preciso levar em conta o desvio padrão de 8,0%, o qual aponta a aderência das estimativas da metodologia aos valores de referência obtidos em campo. Desta forma, um ajuste de parâmetros numéricos tende a ser representativo para esta metodologia, no caso da obra em análise.

No entanto, é preciso considerar que o método de Lobo alcançou $Q_{\text{LOBO}}/Q_{\text{ECD}} = 98,4 \pm 10,1\%$ quando analisadas as estacas da obra A, cujo perfil geotécnico é semelhante. Este fato indica que o comportamento das previsões da capacidade de carga pode não ser único mesmo quando são analisadas estacas cravadas em solos da mesma formação geológica. É preciso levar em conta que diversos fatores interferem na capacidade de carga do sistema

solo-estaca e, desta forma, nota-se que os métodos semiempíricos não conseguem representar todas as particularidades da análise de cada elemento de fundação.

Sabe-se que, na obra B, o período de *set up* ocorrido entre a cravação e recravação das estacas varia entre 1 e 21 dias, o que pode explicar o ganho de resistência dos sistemas solo-estaca e consequentemente a estimativa conservadora do método de Lobo. Por sua vez, o maior número de dias decorridos entre a cravação e a realização dos ensaios de carregamento dinâmico nas estacas da obra A é de 11 dias, o que implica em menor tempo para o efeito de *set up*.

O método de Vorcaro-Velloso segue a tendência de estimar valores maiores que os de referência e, assim como na obra A, a dispersão dos resultados é pouco maior do que a observada no método de Lobo. Os métodos de Décourt-Quaresma e Aoki-Velloso, embora apresentem valores maiores no cálculo da razão entre valores estimados e valores de referência, são os que têm maior dispersão. Este comportamento é indicado pela análise do coeficiente de variação das séries de dados.

De forma geral, os resultados obtidos para as estacas da obra B indicam melhor adequação dos métodos de Lobo e de Vorcaro-Velloso, tal como ocorre para as estacas da obra A. No entanto, convém salientar que as estimativas do segundo método tendem a ser superiores aos valores reais, o que não permite seu uso indiscriminado antes de aferições em campo e consequente ajuste da metodologia. Da mesma forma, o método de Lobo tende a fornecer resultados conservadores, os quais podem ter melhor ajuste às condições locais mediante a observação do comportamento das estacas no terreno onde serão cravadas.

O subsolo encontrado na obra C é composto por argila de baixa resistência até os 6 m. Desta profundidade em diante ocorrem siltes arenosos com $N_{SPT} \cong 5$ golpes, ou siltes argilosos com resistência à penetração entre 9 e 20 golpes. A indicação de impenetrabilidade ocorreu entre 8 e 10 m de profundidade. Na Figura 5 indica-se o perfil geotécnico da obra C. Todas as estacas têm seção transversal quadrada com lado igual a 30 cm, com profundidades que variam entre 7 e 11 m. Estas estacas têm, nos boletins de sondagem à percussão, a indicação de ponta em solos do tipo silte argiloso ou arenoso.

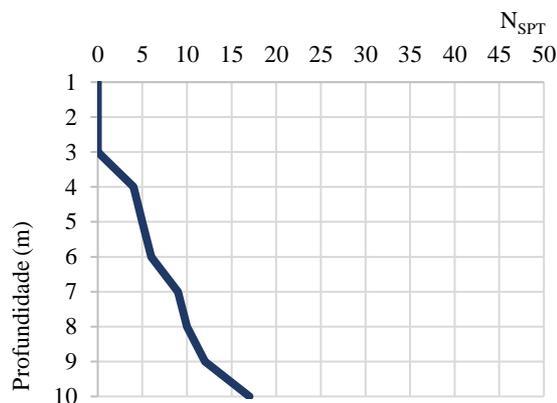


Figura 5. Perfil geotécnico típico da obra C.

No gráfico da Figura 6 são indicados os resultados obtidos a partir dos métodos semiempíricos em análise, bem como os valores calculados a partir dos ensaios de carregamento dinâmico. As oito primeiras estacas – da P8A T1 à P31B T4 – têm ponta em solos do tipo silte arenoso, enquanto as demais assentam-se sobre siltes argilosos.

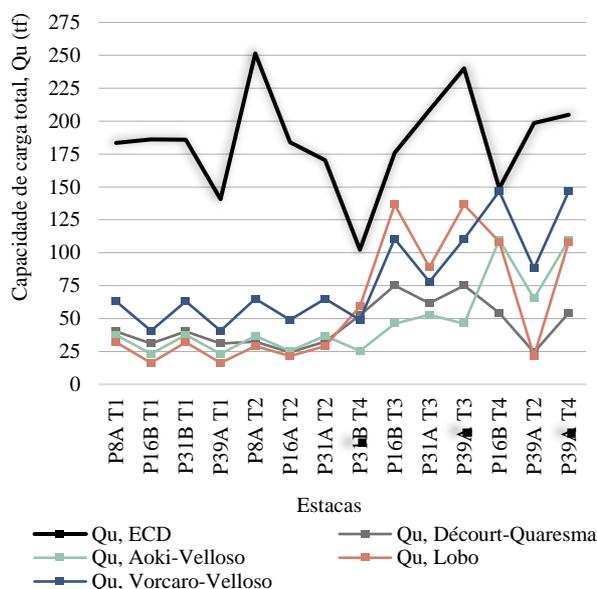


Figura 6. Estimativas da capacidade de carga total por métodos semiempíricos para as estacas da obra C.

Nota-se a variabilidade da capacidade de carga atingida por estas estacas. Embora tenham a mesma seção transversal e comprimentos relativamente próximos, é evidente que as estacas apresentam particularidades no que diz respeito ao comportamento do sistema solo-estaca. Além disso, sabe-se que esta variabilidade não está, necessariamente, relacionada ao número de golpes apresentado quando avaliada a resistência à penetração.

É nítido que todas as metodologias de cálculo resultam em subestimativas expressivas quando se trata de elementos com ponta em solos do tipo silte arenoso. Por sua vez, as estimativas para pontas em siltes argilosos denotam grande variabilidade, sendo que nenhuma das metodologias analisadas consegue captar o comportamento do solo local. Além de o erro médio absoluto resultar em valores significativos, as estimativas se dão com reduzida homogeneidade estatística. Isso é indicado pelo coeficiente de variação das séries de dados, que atinge 76,4% no método de Lobo. Pelos resultados obtidos, nota-se que siltes argilosos e arenosos da Formação Ponta Grossa podem representar procedimentos de maior complexidade quando se trata do ajuste das metodologias semiempíricas de cálculo da capacidade de carga.

A obra D se caracteriza por subsolo com argilas de baixa resistência até os 10 m. A partir daí, em alguns furos são observadas argilas com N_{SPT} da ordem de 7 golpes, enquanto em parte das sondagens são observados siltes argilosos por volta de 12 m com resistências variando entre 16 e 50 golpes. Em outras, o solo segue sendo do tipo argila até a indicação de impenetrabilidade, sendo as profundidades dos furos compreendidas entre 12 e 32 m. Na Figura 7 indica-se o perfil geotécnico da obra D.

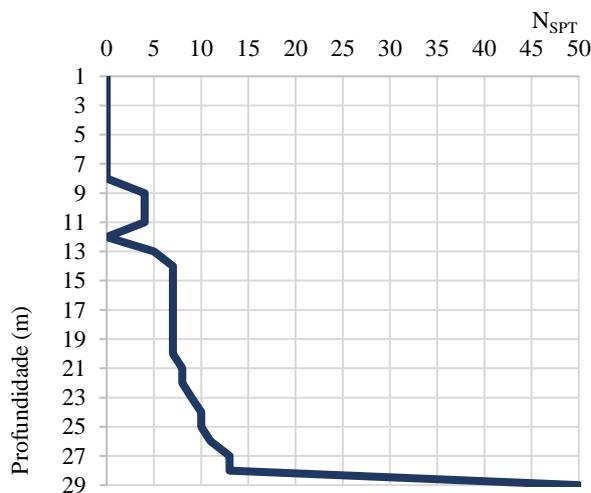


Figura 7. Perfil geotécnico típico da obra D.

As estacas têm seção transversal quadrada, com dimensões entre 20 e 30 cm, ou hexagonal com diâmetro de 33 cm. Os comprimentos variam de 11 a 29 m. No gráfico da Figura 8 são indicados os resultados para as estacas quadradas, e na Figura 9, para as que têm seção transversal hexagonal.

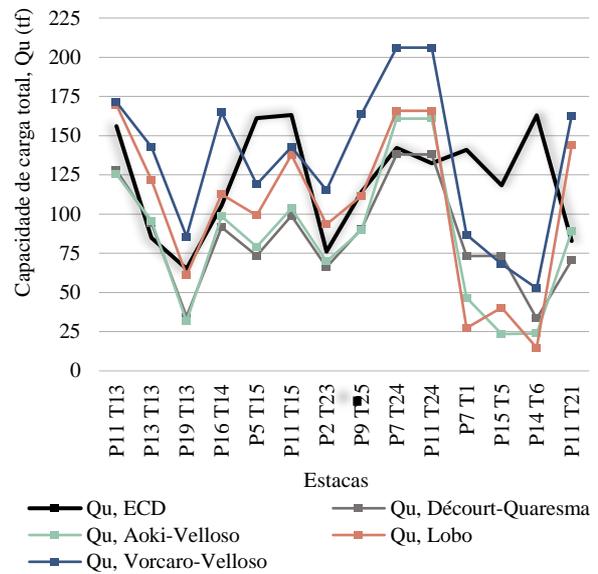


Figura 8. Estimativas da capacidade de carga total por métodos semiempíricos para as estacas de seção transversal quadrada da obra D.

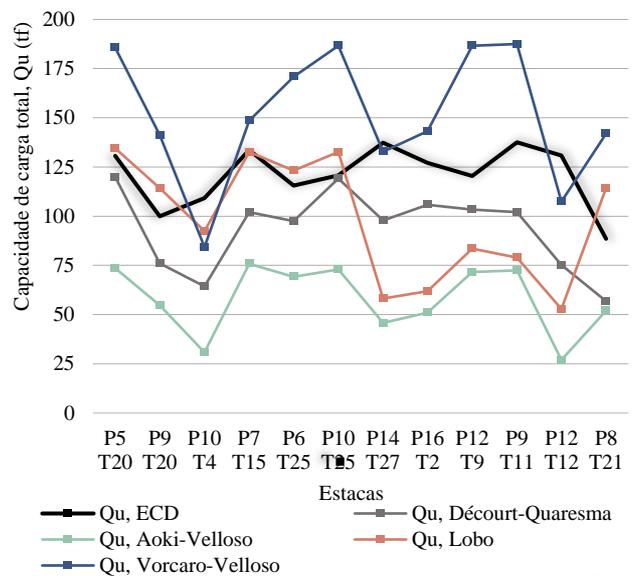


Figura 9. Estimativas da capacidade de carga total por métodos semiempíricos para as estacas de seção transversal hexagonal da obra D.

Os métodos de Aoki-Velloso e Décourt-Quaresma têm comportamentos semelhantes entre si quando analisadas as estacas quadradas. Em relação às estacas hexagonais, esta semelhança não é igualmente evidente. Além disso, é preciso considerar que, embora os valores médios de $Q_{ESTIMADO}/Q_{ECD}$ atinjam valores próximos à unidade, como ocorre no método de Lobo, é mais conveniente observar como se dá a dispersão das estimativas em torno deste valor médio.

Para as estacas quadradas, a menor dispersão é encontrada no método de Décourt-Quaresma, onde o coeficiente de variação é igual a 34,4%. Considera-se que este valor indica pequena homogeneidade dos resultados, embora este seja o menor valor entre os métodos analisados. O método de Lobo, em movimento contrário ao que se observa nas obras A e B, apresenta a maior variabilidade entre todas as metodologias para as estacas quadradas, embora ambas as obras façam parte da mesma formação geológica. O método de Vorcaro-Velloso é disperso e resulta em valores superiores aos de referência, como é comum de ser observado em todas as obras.

Para as estacas hexagonais, nota-se que a variabilidade da capacidade de carga obtida em campo é menor quando comparada às estacas quadradas, embora não seja sutil. Evidentemente, a capacidade de carga do sistema solo-estaca é influenciada de maneira direta pela seção transversal e pelo comprimento do elemento de fundação. Todavia, deve-se notar que os métodos semiempíricos não têm, necessariamente, facilidade ao prever os fatores influentes neste comportamento.

Tanto estacas quadradas quanto hexagonais têm estimativas mais coerentes quando estas são obtidas pelo método de Décourt-Quaresma. No entanto, o desempenho desta metodologia ainda não é plenamente satisfatório em relação à sua variabilidade e homogeneidade estatística. Além disso, é preciso considerar que o efeito de *set up* pode interferir de maneira intensa em estacas cravadas em perfil geotécnico semelhante ao observado na obra D.

5 CONCLUSÕES

Os métodos semiempíricos são largamente utilizados na análise de fundações profundas. No entanto, pela sua natureza empírica, estas metodologias são influenciadas pelas condições locais de onde foram idealizadas, associando comportamentos que podem variar a depender da formação geológica e de diversos fatores relacionados à formação do solo local. Deste modo, o uso de tais metodologias requer cautela quanto à aplicabilidade em condições distintas das de origem, o que demanda uma análise que considere os fatores locais que influenciam na capacidade de carga de um sistema solo-estaca.

Com base nos resultados obtidos nas análises apresentadas, pode-se afirmar que, no caso de solos da Formação Ponta Grossa, os métodos de Lobo (2005) e de Vorcaro-Velloso (GOMES, 2000) apresentam estimativas coerentes da capacidade de carga total quando se trata de perfis geotécnicos definidos por camadas de argila mole seguidas por

camadas de argila rija de maior resistência. Pelas observações realizadas, é possível dizer que estes dois métodos podem ser utilizados em conjunto para atuar como balizadores das estimativas obtidas, fornecendo um intervalo de valores para obtenção da capacidade de carga total neste tipo de perfil geotécnico.

Embora o método de Vorcaro-Velloso resulte em estimativas que, por si só, são contra a segurança, a aplicação da metodologia para este tipo de perfil geotécnico resulta em valores que acompanham as variações observadas em campo a partir dos laudos de ECD. Este comportamento é também observado no método de Lobo, porém com estimativas inferiores ao que se obtém nos ensaios de referência. Neste sentido, o uso de ambas as metodologias em conjunto pode fornecer uma faixa de confiabilidade das estimativas para a capacidade de carga, desde que seja observado o perfil geotécnico específico da situação.

Estacas cravadas em solos da Formação Ponta Grossa cujo fuste se compõe de solos do tipo silte argiloso ou silte arenoso não têm desempenho satisfatório em nenhum dos métodos semiempíricos analisados. No entanto, é preciso considerar que este tipo de perfil geotécnico se mostra com variabilidades expressivas em relação à capacidade de carga observada em ensaios de campo, o que denota maior complexidade na estimativa do comportamento de estacas cravadas neste tipo de solo.

De forma geral, observa-se que fustes com reduzida resistência à penetração resultam em pequenas capacidades de carga, principalmente quando analisada a parcela correspondente ao atrito lateral, de acordo com as estimativas dos métodos semiempíricos. No entanto, a análise dos resultados evidencia que o mecanismo resistente pode ser diferente do previsto pelos métodos que se baseiam no índice N_{SPT} , o que pode ocorrer ao analisar solos lateríticos. Deste modo, pode-se dizer que uma análise de maior coerência deve abordar equações que levem em conta o perfil de solo de maneira completa, com especificidades para situações e perfis geotécnicos típicos, e não apenas o número de golpes observado.

É evidente, também, que o ensaio SPT não fornece informações suficientes para aplicação no dimensionamento de estacas cravadas em solos moles. Apesar disso, para as estacas cravadas em extensas camadas de argilas moles da Formação Ponta Grossa, com comprimentos de até 29 m, observou-se que o método de Décourt-Quaresma teve a menor dispersão nas estimativas da capacidade de

carga total, embora seja conservador. O método também apresentou o menor erro médio absoluto.

Por fim, é possível afirmar que a aplicabilidade dos métodos semiempíricos analisados aos solos da cidade de Ponta Grossa é dependente do perfil típico observado no subsolo em estudo, mesmo onde estejam presentes as mesmas formações geológicas. Além disso, a análise da dispersão dos resultados foi fundamental na análise e escolha do método mais adequado. É de extrema importância que seja verificada como ocorre a dispersão de um método de cálculo em relação às estimativas fornecidas, uma vez que coeficientes de correção apenas são representativos nos casos em que se observam resultados homogêneos. Desta forma, os métodos semiempíricos aqui analisados não são recomendados para uma aplicação indiscriminada aos solos da região.

AGRADECIMENTOS

Às empresas “Ensolo – Engenharia de Solos e Fundações LTDA”, “Fugro *In Situ* Geotecnia LTDA” e “Prestes Construtora e Incorporadora LTDA”, que gentilmente disponibilizaram relatórios de seus ensaios de carregamento dinâmico, bem como os projetos, para as análises realizadas.

REFERÊNCIAS

- Alonso, U.R. (2011). *Previsão e controle das fundações*. Blucher: São Paulo, 2ª ed, 146 p.
- Aoki, N., Velloso, D.A. (1975). An approximate method to estimate the bearing capacity of piles. *5 Congresso Panamericano de Mecânica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones*. Sociedad Argentina de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones: Buenos Aires, 367-376.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007). *NBR 13208: Estacas – Ensaios de carregamento dinâmico*. 12 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). *NBR 6484: Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT*. 28 p.
- Décourt, L., Quaresma, A.R. (1978). Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT. *6 Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos*. ABMS: Rio de Janeiro, 45-53.
- Gomes, M.C.V. (2000). *Estimativa da carga última compressiva em estacas a partir do SPT por regressão linear múltipla*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. 302 p.
- Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Ponta Grossa – IPLAN (2006). *Plano diretor participativo do Município de Ponta Grossa*. 2006. 53 p.
- Lobo, B.O. (2005). *Método de previsão de capacidade de carga de estacas: aplicação dos conceitos de energia do ensaio SPT*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 130 p.
- Melo, M.S. et al. (2003). Sedimentação quaternária no espaço urbano de Ponta Grossa, PR. *Geociências*, 22 (1), 33-42.
- Niyama, S., Aoki, N., Chamecki, P.R. (1998). Verificação de desempenho. In: Hachich, W. et al. *Fundações: teoria e prática*. Editora Pini: São Paulo, 2ª ed, cap. 20, 723-751.
- Sá, M.F.M. (2010). Os solos dos Campos Gerais. In: Melo, M.S., Moro, R.S., Guimarães, G.B. (org.). *Patrimônio natural dos Campos Gerais*. UEPG: Ponta Grossa, cap. 6. 73-83.
- Schnaid, F., Odebrecht, E. (2012). *Ensaios de campo e suas aplicações à engenharia de fundações*. Oficina de Textos: São Paulo, 2ª ed.
- Simons, N.E., Menzies, B.K. (1981). *Introdução à engenharia de fundações*. Interciência LTDA: Rio de Janeiro, 199 p.
- Tsuha, C.H.C., Aoki, N., Cintra, J.C.A. (2013). Prova de carga dinâmica. In: Cintra, J.C.A., Aoki, N., Tsuha, C.H.C., Giacheti, H.L. *Fundações: ensaios estáticos e dinâmicos*. Oficina de Textos: São Paulo, cap. 5, 97-133.
- Velloso, D.A., Lopes, F.R. (2010). *Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas*. Oficina de Textos: São Paulo, 568 p.