

Capítulo 5

Avaliação do Método de Van Der Veen para estimativa das cargas de ruptura em estacas raiz da cidade de Fortaleza

Fernando Feitosa Monteiro

Alfran Sampaio Moura

Marcos Fábio Porto de Aguiar

Renato Pinto da Cunha

Yago Machado Pereira de Matos

Resumo: A prova de carga estática é o ensaio de campo mais utilizado para a determinação da capacidade de carga de fundações profundas. A partir do ensaio, é possível verificar o comportamento da fundação, através do carregamento com incrementos progressivos de carga no topo da estaca, até que se atinja o dobro da carga de trabalho ou que haja ocorrência da ruptura da estaca (sistema estaca-solo). Quando uma prova de carga não é levada até a ruptura ou a um nível de recalque que caracterize ruptura, realiza-se uma extrapolação da curva carga-recalque, com objetivo de estimar a carga de ruptura da estaca. Dentre os métodos mais utilizados para extrapolação da curva carga-recalque, têm-se o método de Van Der Veen (1953). O trabalho apresenta uma avaliação do método de Van Der Veen (1953) para a estimativa da carga de ruptura, analisando diferentes trechos do carregamento de curvas carga-recalque, obtidas em provas de carga estáticas realizadas em estacas raiz da cidade de Fortaleza. A partir das análises realizadas, observa-se que para uso do método faz-se necessário uma curva carga-recalque bem caracterizada de ruptura, com cargas máximas próximas a 90% da carga última inferida. Vale comentar ainda que a utilização do método para estágios de carga no trecho inicial da curva podem acarretar em previsões de carga de ruptura insatisfatórias.

Palavras-Chave: Prova de carga, Estaca raiz, Van der Veen.

1. INTRODUÇÃO

A estimativa da capacidade de carga de fundações por estacas é prática comum na engenharia de fundações brasileira. De modo geral, a capacidade de carga é estimada a partir de métodos semi-empíricos baseados no N_{SPT} do ensaio de sondagem a percussão (SPT). A verificação em campo da capacidade de carga das estacas é usualmente realizada a partir de provas de carga estática. A prova de carga estática tem como objetivo, apresentar a história do carregamento real de uma construção, que se realiza em estágios de carga quase sempre crescentes, ao longo do tempo, visando à avaliação da segurança que a fundação apresenta em relação ao estado último ou de ruptura (AOKI, 1997).

Quando uma prova de carga não atinge a carga máxima desejada, ou não possui-se visualização nítida desta, geralmente se recorre a métodos de extrapolação e interpretação das curvas carga versus recalque obtidas. Assim, o objetivo do presente trabalho é avaliar a aplicabilidade do método de Van der Veen (1953) em casos onde a prova de carga não seja levada a ruptura.

2. PROVA DE CARGA ESTÁTICA

A prova de carga estática em estacas verticais ou inclinadas no Brasil, é regulamentada pela ABNT (2006) e consiste no carregamento com incrementos progressivos de carga no topo da estaca, medindo simultaneamente os respectivos recalques. A ABNT (2006) ainda determina que os esforços aplicados podem ser axiais de tração ou de compressão, ou ainda transversais, sendo propostos quatro tipos de carregamento, sendo eles: lento, rápido, misto e cíclico. Porém, no Brasil, o carregamento lento é o mais utilizado.

Moura et al. (2011) relatam que uma grande vantagem da prova de carga estática é o fato de tratar-se de um ensaio que submete o complexo conjunto solo-fundação às condições reais de trabalho. Ressalta-se que, quando um pequeno acréscimo de carga provoca um grande recalque, define-se na curva um trecho assintótico vertical, cuja carga correspondente é denominada carga de ruptura. A determinação desta carga sem que o sistema estaca-solo tenha rompido é uma questão polêmica na engenharia de fundações, embora a metodologia de Van der Veen (1953) tenha grande aceitação nacional (FOÁ, 2001). Quando uma prova de carga não é levada até a ruptura ou a um nível de recalque que caracterize ruptura, realiza-se uma extrapolação da curva carga-recalque, com objetivo de estimar a carga de ruptura da estaca. Dentre os métodos mais utilizados para extrapolação da curva carga-recalque, têm-se o método de Van Der Veen (1953). O método de Van Der Veen (1953) propõe que a carga e o deslocamento no topo de uma estaca apresentem uma relação exponencial, que representa a curva carga-recalque, como visto na equação seguinte:

$$Q = Q_{ult}(1 - e^{-\alpha\rho}) \quad (1)$$

Onde: Q_{ult} é a carga de ruptura; Q é carga aplicada no topo da estaca; α é o coeficiente que define a forma da curva; ρ é o recalque correspondente à carga aplicada. Esta curva é assintótica a uma reta vertical que caracteriza a carga de ruptura (Q_{ult}). Reescrevendo essa função $Q = Q_{ult}(1 - e^{-\alpha\rho})$ tem-se a equação 2, que corresponde a uma reta que passa pela origem, quando plotada em uma escala semilogarítmica de base neperiana. Aoki (1976) observa que a não obrigatoriedade em passar pela origem do sistema de coordenadas pode melhorar a regressão, dessa forma, propõe uma extensão da expressão de Van der Veen (1953) conforme a equação 3. Sendo que b representa o intercepto no eixo dos recalques, da reta obtida na escala semilogarítmica.

$$\alpha\rho = -\ln\left(1 - \frac{Q}{Q_{ult}}\right) \quad (2)$$

$$Q = Q_{ult}(1 - e^{-(\alpha\rho+b)}) \quad (3)$$

Paschoalin Filho e Albuquerque (2012) avaliaram a aplicabilidade do método de Van der Veen em estacas do tipo raiz submetidas a tração em solo poroso de diabásio. De acordo com os autores, o método mostrou-se aplicável quando se desenvolve cargas próximas a 80% da carga última, indicando desta forma que há a necessidade de levar uma prova de carga a pelo menos este valor para que se tenha uma carga extrapolada mais confiável.

3. ESTUDO DE CASO

As áreas de estudo que foram designadas para a realização da pesquisa foram definidas partindo do critério de demanda de obras com soluções de fundações em estacas raiz, onde posteriormente se fizessem provas de carga estática nas mesmas. As provas de carga foram realizadas em obras situadas na região metropolitana de Fortaleza, no estado do Ceará (Figura 1).

A região é caracterizada por apresentar as seguintes feições geológicas: rochas cristalinas, dos tipos metamórficas e ígneas, do Complexo Nordestino, sedimentos terciários do Grupo Barreiras e dunas do tipo edafizadas e móveis. Todas essas feições são cortadas por cursos d'água do sistema fluvial, com depósito dos sedimentos recentes. O Grupo ou Formação Barreiras distribui-se como uma faixa sedimentar de largura variável (até 30km), acompanhando a linha da costa, sendo parcialmente recoberta junto ao litoral por dunas e areias marinhas. Consistem de argilas variegadas e arenitos avermelhados, ricos em cascalho, apresentando camadas laterizadas e conglomerados grosseiros com cimento ferruginoso (óxidos de ferro).

Figura 1. Localização das obras



A obra 1 situa-se no bairro Guararapes, nas proximidades da Av. Washington Soares, que apresenta acentuada densidade de edificações na vizinhança. O perfil estratigráfico do solo da obra 1, apresenta um perfil composto por transições de solos areno-siltosos, areno-argilosos, argilo-arenosos (Figura 2). Observa-se que o índice de resistência à penetração (N_{SPT}), apresenta valores baixos até aproximadamente 12 m de profundidade, seguido de um acréscimo relevante na camada de argila arenosa, ao longo de toda sua extensão. O nível da água encontra-se a aproximadamente 7 m de profundidade.

A obra 2 localiza-se no bairro do Cocó, que apresenta alta densidade de edificações na vizinhança. O perfil estratigráfico do subsolo, para a sondagem mais próxima a estaca 2 (SP- 1), apresenta uma camada de areia siltosa de 2 m, seguida por uma camada de silte argiloso com espessura de 9 m e por uma camada de 12 m de argila arenosa (Figura 3). Já para a sondagem com maior proximidade da estaca 3 (SP-2), identifica-se um perfil geotécnico similar, onde o perfil é composto por camadas de solos areno-siltosos e silto-argilosos (Figura 3). Verifica-se que o índice de resistência à penetração (N_{SPT}), apresenta valores menores até 7 m de profundidade. Já o nível da água encontra-se a aproximadamente 4 m de profundidade.

Figura 2. Perfil estratigráfico da Obra 1 e variação do N_{SPT} com a profundidade

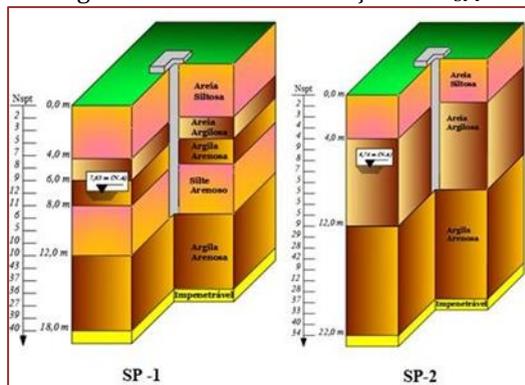
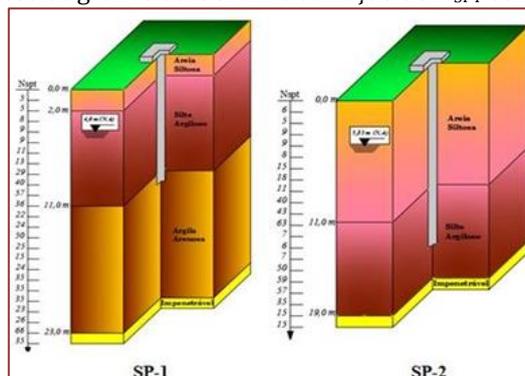


Figura 3. Perfil estratigráfico da Obra 1 e variação do N_{SPT} com a profundidade



Para a realização desta pesquisa, foram executadas três estacas do tipo raiz, sendo duas com diâmetro de 0,41 m e comprimentos de 12 e 16 m, e outra com diâmetro de 0,35 e comprimento de 12 m. Na Tabela 1, estão descritas algumas características geométricas e de execução das fundações em estacas raiz das obras estudadas.

Tabela 1 – Características geométricas e executivas das estacas ensaiadas

Obra			
Dados	1	2	
Estaca	1	2	3
L (m)	12	16	12
D (mm)	350	410	410
Pressão de injeção (kPa)	300	300	300
Carga de Trabalho (kN)	800	1200	1200

As estacas analisadas na obra 1 foram submetidas à prova de carga lenta, de acordo com a ABNT (2006). O carregamento das estacas ensaiadas foi realizado em 9 estágios de carga correspondente, cada um, a 22,5% da carga de trabalho da mesma. A Figura 4 apresenta a curva carga-recalque obtida para a prova de carga da estaca 1. Durante a prova de carga estática, a estaca 1 foi sujeita uma carga de 1620 kN, alcançando um recalque máximo de 15,61 mm. Após o descarregamento, obteve-se um recalque residual no valor de 10,10 mm. Neste caso, não foi aplicado o décimo estágio de carga, pois a estaca evidenciou uma eminência de ruptura devido aos elevados deslocamentos.

As estacas avaliadas na obra 2 foram submetidas à prova de carga lenta. O carregamento das estacas ensaiadas foi realizado em 10 estágios de carga correspondente, cada um, a 20% da carga de trabalho da mesma. As Figuras 5 e 6 apresentam as curvas carga-recalque obtidas para as provas de carga das estacas 2 e 3. A estaca 2 foi submetida a uma carga máxima de 2400 kN, provocando um recalque máximo de 13,85 mm. Após o descarregamento, obteve-se um recalque residual de 3,54 mm. Já a carga máxima da prova de carga realizada na estaca 3 foi de 2400 kN, e o recalque máximo de 25,04 mm. Já o recalque residual obtido após o descarregamento foi de 18,28 mm durante o descarregamento.

Figura 4. Curva carga – recalque para a estaca 1

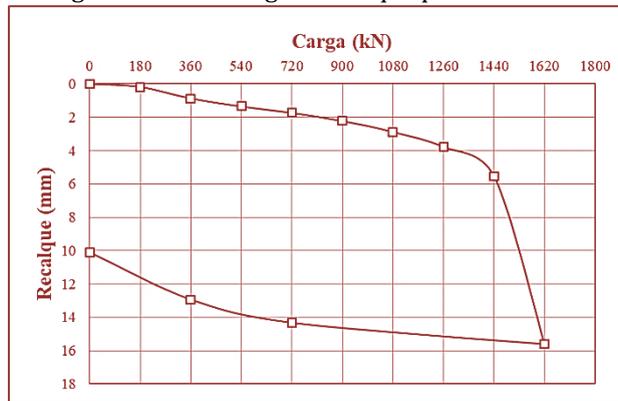


Figura 5. Curva carga – recalque para a estaca 2

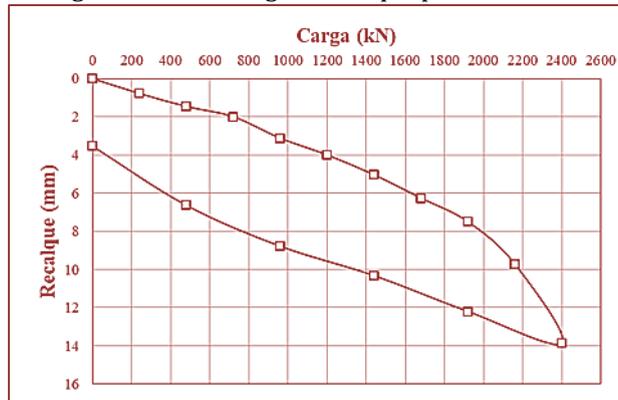


Figura 6. Curva carga – recalque para a estaca 3



Para a estimativa das cargas de ruptura das estacas submetidas a compressão foi utilizado o método de Van der Veen (1953) modificado por Aoki (1976). As cargas de ruptura das estacas avaliadas foram calculadas considerando-se que a prova de carga tenha sido suspensa em recalques situados em pontos referentes a 50, 60, 70, 80 e 90% das cargas máximas obtidas pelas provas de carga que foram levadas até a ruptura, conforme a metodologia realizada por Paschoalin Filho e Albuquerque (2012). Este procedimento teve por finalidade avaliar a aplicabilidade deste método caso a prova de carga fosse interrompida prematuramente. O procedimento supracitado não foi aplicado a estaca 2, pois o ensaio não indicou uma ruptura nítida.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 2 são apresentados os valores de carga de ruptura e recalques correspondentes a carga última da prova de carga (Q_{ult}) e carga de trabalho ($Q_{ult}/2$).

Tabela 2. Valores de recalque para Q_{ult} e $Q_{ult}/2$ da PCE

Estaca	L (m)	Q_{max} (kN)	pQ_{ult} (mm)	$pQ_{ult}/2$ (mm)
1	12	1620	15,61	1,30
2	16	2400	13,85	3,81
3	12	2400	25,04	3,92

A Tabela 3 apresenta as cargas de ruptura obtidas por meio do método de Van der Veen (1953) modificado por Aoki (1976) considerando-se o máximo recalque obtido nas provas de carga (Q_{vv}).

Tabela 3. Cargas de ruptura (Q_{vv}) a partir do método de Van der Veen (1953)

Estaca	Q_{max} (kN)	Q_{vv} (kN)	Q_{vv} / Q_{ult}
1	1620	1642	1,01
2	2400	2650	1,10
3	2400	2420	1,01

Na Tabela 3 observa-se que o valor de Q_{vv}/Q_{ult} médio foi de 1,04 com desvio padrão de 0,05 e coeficiente de variação de apenas 5,1%. As Tabelas 4 a 8 apresentam as cargas de ruptura obtidas por meio do Método de Van der Veen (1953) modificado por Aoki (1976), avaliando-se os recalques situados em pontos referentes a 50, 60, 70, 80 e 90% da cargas máximas obtidas pelas provas de carga que foram levadas até a ruptura.

Tabela 4. Cargas de ruptura (Q_{vv}) a partir do método de Van der Veen (1953) para recalques correspondentes a 50% dos recalques da carga máxima da PCE

Estaca	Q_{ult} (kN)	$Q_{vv50\%}$ (kN)	$Q_{vv50\%} / Q_{ult}$
1	1642	845	0,51
3	2420	1224	0,51

Tabela 5. Cargas de ruptura (Q_{vv}) a partir do método de Van der Veen (1953) para recalques correspondentes a 60% dos recalques da carga máxima da PCE

Estaca	Q_{ult} (kN)	$Q_{vv60\%}$ (kN)	$Q_{vv60\%} / Q_{ult}$
1	1642	997	0,61
3	2420	1511	0,62

Tabela 6. Cargas de ruptura (Q_{vv}) a partir do método de Van der Veen (1953) para recalques correspondentes a 70% dos recalques da carga máxima da PCE

Estaca	Q_{ult} (kN)	$Q_{vv70\%}$ (kN)	$Q_{vv70\%} / Q_{ult}$
1	1642	1134	0,69
3	2420	1734	0,72

Tabela 7. Cargas de ruptura (Q_{vv}) a partir do método de Van der Veen (1953) para recalques correspondentes a 50% dos recalques da carga máxima da PCE

Estaca	Q_{ult} (kN)	$Q_{vv80\%}$ (kN)	$Q_{vv80\%} / Q_{ult}$
1	1642	1296	0,79
3	2420	1900	0,79

Tabela 8. Cargas de ruptura (Q_{vv}) a partir do método de Van der Veen (1953) para recalques correspondentes a 50% dos recalques da carga máxima da PCE

Estaca	Q_{ult} (kN)	$Q_{vv90\%}$ (kN)	$Q_{vv90\%} / Q_{ult}$
1	1642	1486	0,90
3	2420	2159	0,89

Avaliando os resultados obtidos, verifica-se que os valores de Q_{vv}/Q_{ult} apresentam valores médios inferiores a 1, considerando pontos situados até recalques referentes a 50, 60, 70, 80% das cargas máximas obtidas pelas provas de carga. Inferindo assim, que a extrapolação da curva carga-recalque a partir do método de Van der Veen (1953) modificado por Aoki (1976) apresenta resultados satisfatórios para uma curva que apresente ruptura bem caracterizada.

Considerando-se os pontos referentes aos recalques para as cargas máximas obtidas pelas provas de carga, o método apresentou praticamente mesmo valor de Q_{vv}/Q_{ult} iguais a 1. As Figuras 7 e 8 apresentam a variação de Q_{vv}/Q_{ult} para os cenários propostos pela metodologia de Paschoalin Filho e Albuquerque (2012), a fim de elucidar a análise realizada a partir de uma perspectiva gráfica.

Figura 7. Valores de Q_{vv}/Q_{ult} para estaca 1

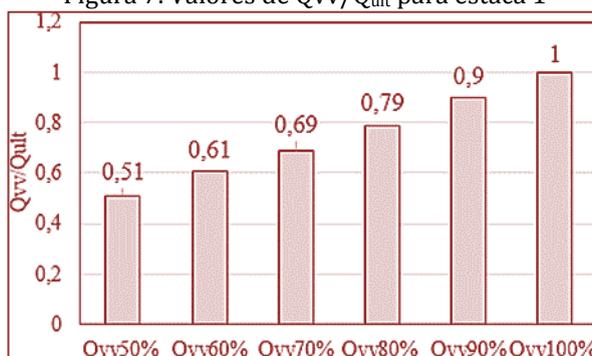
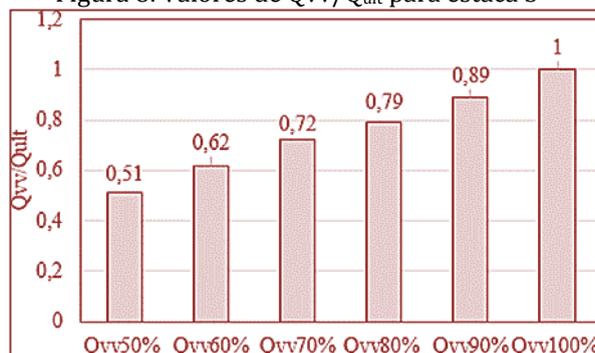


Figura 8. Valores de Q_{vv}/Q_{ult} para estaca 3



Verifica-se que a aplicação do método de Van der Veen (1953) modificado por Aoki (1976) para trechos iniciais da curva carga-recalque das estacas raiz analisadas apresenta extrapolações insatisfatórias. Ao passo que para cargas próximas a 90% da carga última, o método aponta previsões satisfatórias.

5. CONCLUSÕES

Conclui-se que a aplicabilidade do método de Van der Veen (1953) modificado por Aoki (1976) para provas de carga que não foram levadas a ruptura está condicionada a uma curva carga-recalque com ruptura bem caracterizada. O método mostrou-se aplicável quando se desenvolve cargas próximas a 90% da carga última, inferindo a necessidade de atingir valores desta ordem de grandeza em provas de carga, afim de se obter uma carga extrapolada de maior confiabilidade. Vale comentar ainda que a utilização do método para estágios de carga no trecho inicial da curva podem acarretar em previsões de carga de ruptura insatisfatórias.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro e concessão de bolsas.

REFERÊNCIAS

- [1] Aoki, N. (1976). Considerações sobre a capacidade de carga de estacas isoladas. Notas de Aula, Universidade Gama Filho.
- [2] Aoki, N. (1997). Determinação da capacidade de carga última de estaca cravada em prova de carga dinâmica de energia crescente. Tese de Doutorado, EESC/USP, São Carlos, 111p.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2006). 12131: Estacas – Prova de carga estática – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro: Moderna, 16 p.
- [4] FÓA, S B. (2001). Análise de prova de carga dinâmica de energia crescente para o projeto de fundações profundas. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 200p.
- [5] Moura, A.S; Nóbrega Júnior, A.J. e Aguiar M.F.P. (2011). 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 de Tecnologia, Vol. 32, p. 56-72.
- [6] Paschoalin Filho, J.A.; Albuquerque, P.J.R. (2012). Aplicação do Método de Van der Veen (1953) para a estimativa das cargas de ruptura de estacas raiz tracionadas executadas em solo poroso de diabásio. XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, ABMS, Porto de Galinhas, v.1, p 1-8.
- [7] Van der veen, C. Bearing capacity of a pile. In: International conference soil mechanics foundation engineering, 3., 1953, Zurich. Proceedings. Zurich, 1953. v. 2.