

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.

João Alexandre Paschoalin Filho

Universidade Nove de Julho/SP. Departamento de Exatas. Curso de Engenharia Civil

Engenheiro Geotécnico Moretti Engenharia Consultiva Ltda/SP.

e-mail: jalexandre@uninove.br, joao@morettiengenharia.com.br

Paulo José Rocha de Albuquerque

Universidade Estadual de Campinas/SP. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

e-mail: pjra@fec.unicamp.br

RESUMO: Em projetos de fundações profundas não é rara a necessidade da determinação da capacidade de carga de estacas considerando-se esforços de tração. Para isso, pode-se utilizar o recurso da prova de carga como ferramenta de obtenção destes parâmetros. Entretanto, em algumas vezes, devido a problemas diversos, estes ensaios não são conduzidos até a carga que caracterize a ruptura da ligação estaca/solo. Diante disso, poderão ser utilizadas diversas metodologias para sua estimativa, tendo como base os dados obtidos no ensaio. Contudo, os métodos utilizados para estas estimativas foram elaborados para estacas comprimidas axialmente, não havendo metodologias específicas para estacas tracionadas. Este trabalho apresenta as estimativas das cargas de ruptura de estacas tracionadas por meio do método de *Van der Veen* (1953) considerando-se recalques situados em pontos referentes a 50, 60, 70, 80 e 90% das cargas máximas obtidas por provas de carga que foram levadas até a ruptura. Este procedimento teve por objetivo verificar a aplicabilidade deste método caso a prova de carga seja interrompida precocemente. Para tal, foram executadas provas de carga estáticas lentas à tração, conduzidas até um deslocamento que caracterizasse a ruptura da ligação estaca/solo em três estacas tipo raiz com 12 m de comprimento e 0,41 m de diâmetro e uma estaca raiz de 23 m e 0,31 cm de diâmetro executadas no Campo Experimental para Estudos de Mecânica dos Solos e Fundações da Unicamp, localizado na cidade de Campinas/SP. Por fim, analisa-se os valores das cargas estimadas por meio do método e àquelas obtidas por meio das provas de carga.

PALAVRAS-CHAVE: Estacas tracionadas, estacas raiz, provas de carga, métodos de extrapolação.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Estacas submetidas a esforços de tração

A carga de ruptura de um elemento de fundação, submetido a um esforço tração, poderá ser considerada como sendo àquela equivalente ao peso próprio do elemento de fundação, acrescido ao peso da massa de solo contida no interior da superfície de ruptura e a resistência ao cisalhamento que ocorre na superfície de ruptura.

Contudo, este problema nem sempre é de fácil resolução, pois o peso de solo a ser considerado será variável com a geometria da

superfície de ruptura, fato este que ainda gera certas discordâncias no meio técnico. Outra dificuldade consiste na obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento desta superfície, pois este certamente irão variar em função das características geomecânicas do solo, bem como com o processo executivo da fundação. Paschoalin Filho (2008).

Um caso bastante corriqueiro de elemento de fundação submetido à esforço de tração consiste no projeto de fundações que servirão de base para torres de linha de transmissão de energia. Nestas, os esforços tracionantes serão ocasionados principalmente em função do vento atuante, tanto na torre, como nos cabos; sendo

este ainda acentuado em função do baixo peso próprio destas estruturas. Paschoalin Filho *et al* (2008).

Existem situações onde os esforços de tração são meramente acidentais, como por exemplo as solicitações causadas pelo vento. Entretanto, também pode-se encontrar situações que estas solicitações apresentam características permanentes, como àquelas ocasionadas principalmente por empuxos de terra e água.

Orlando (1985), afirma que para estacas implantadas em areias, a tendência é que ocorra uma redução da resistência lateral de uma estaca tracionada em relação a resistência desta caso fosse comprimida.

Quando uma estaca é comprimida, as tensões cisalhantes presentes no contato estaca/solo tenderão a sofrer um incremento em função do aumento da tensão vertical efetiva junto à estaca. No caso de uma solicitação à tração, o que ocorre é justamente o inverso. Neste caso as tensões de cisalhamento impostas pela estaca ao solo tenderão a diminuir as tensões efetivas presentes no entorno, o que certamente influenciará na mobilização do atrito lateral.

Contudo, a explanação apresentada é válida ao se assumir superfície de ruptura localizada no contato estaca/solo, fato este ainda em discussão no meio técnico.

De uma forma geral, para a estimativa da carga de ruptura pode-se recorrer a duas linhas metodológicas. A primeira consiste na utilização de métodos teóricos próprios para solicitações de tração, enquanto que a segunda consiste na utilização de métodos semi-empíricos próprios para esforços de compressão.

Em uma prova de carga, quando não se 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. Contudo, estes métodos ainda carecem de pesquisas para comprovar sua adequabilidade em casos de estacas solicitadas a esforços axiais de tração.

1.2 Extrapolação da curvas carga *versus* recalque

De acordo com a ANBT:NBR 6122/2010 o carregamento de uma estaca ou um tubulão pode não indicar uma carga de ruptura nítida. Neste caso pode-se utilizar métodos de extrapolação e interpretação da curva carga *vs* recalque para se avaliar a carga de ruptura.

Existem no meio técnico diversos métodos para extrapolação e interpretação de curvas carga *vs* recalque, entre estes podem ser citados: *Van der Veen* (1953), Método da ABNT:NBR 6122, *Davisson* (1973), Método de *Mazurkiewicz* (1972) entre outros.

De acordo com Massad (1994), prever a forma da curva carga *vs* recalque de estacas submetidas a cargas axiais tem sido uma preocupação de muitos engenheiros. As tentativas vão da exponencial de *Van der Veen* (1953) à hipérbole de *Chin* (1970), passando pela parábola de *Mazurkiewicz* (1972) e tantas outras.

Na literatura geotécnica há uma série de outros critérios para interpretação de provas de carga não conduzidas até a ruptura. A norma inglesa, que define a ruptura convencional como sendo a carga equivalente a um recalque igual a 10% do diâmetro do elemento estrutural de fundação. A ruptura convencional também pode ser definida como a carga correspondente a deformação na ponta da estaca em 10% do seu diâmetro para estacas de deslocamento e escavadas executadas em solos argilosos e de 30% de seu diâmetro no caso de estacas escavadas executadas em solos granulares.

2 CAMPO EXPERIMENTAL

O Campo Experimental Feagri/Unicamp está localizado na Universidade Estadual de Campinas, no município de Campinas/SP na porção Centro-Leste do Estado de São Paulo.

O subsolo do local é formado por magmatitos básicos, sendo observada a presença de rochas intrusivas de formação Serra Geral. Este subsolo recobre uma área total de 98km², ou seja, 14% da área do município de Campinas.

É constituído superficialmente por um horizonte composto por solo poroso originado pela intemperização de micro-gabros com espessura média de 6,5m e constituída por uma argila silto-arenosa porosa. Subjacente, verifica-se a ocorrência de uma camada residual

composta por um silte argilo-arenoso com espessura média de 19m. O nível do lençol freático é encontrado a 17m (Albuquerque, 2001). A Figura 1 apresenta a variação dos valores de N_{spt} com a profundidade.

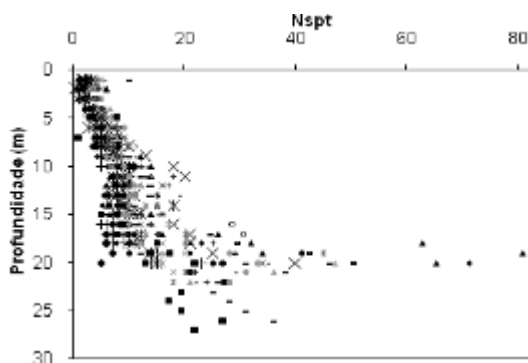


Figura 1. Variação dos valores de N_{spt} .

Por meio da Figura 1 apresentada nota-se que até uma profundidade de 6,5 m, cota referente à argila porosa, os valores de N_{spt} variam entre 1 e 10 golpes/30 cm. Entre 6,5 m e 12 m de profundidade (cota de assentamento das estacas em estudo) os valores de N_{spt} variam entre 10 e 15 golpes/30cm. Entre 20m e 25m os valores de N_{spt} variam entre 20 e 30 golpes/30cm. A partir desta profundidade continua-se observando a tendência de incremento nos valores de N_{spt} . São apresentadas nas Figuras 2 e 3 as variações de f_s e Fr (coeficiente de atrito $Fr=f_s/q_c$) obtidos por meio de ensaios de CPTU conduzidos no local.

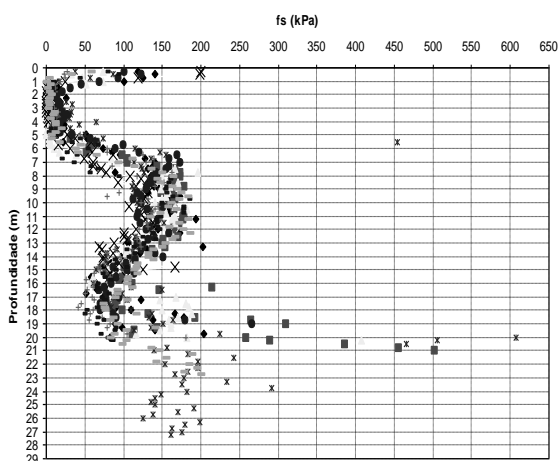


Figura 2. Variação dos valores de f_s (kPa).

Observando-se a Figura 2, nota-se que os valores de f_s até a profundidade de 6,5m apresenta valores variando entre 1 e 25 kPa. Entre 6,5m e 12m de profundidade, pode-se notar

o crescimento destes valores, sendo a variação contida entre 100 e 170 kPa.

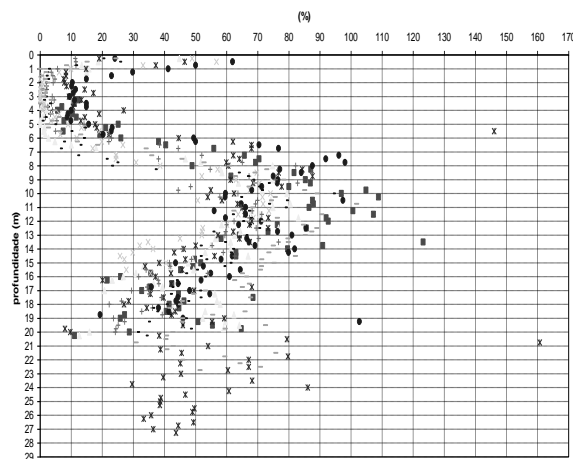


Figura 3. Variação dos valores de Fr (%)

Observando-se Figura 3 nota-se que o valor de Fr até profundidade de 6,5m (limite da camada de argila porosa) apresenta valor máximo de 10% ($f_s=0,1q_c$). Entre 6,5 e 12m os valores de Fr sofrem incremento e apresentam variação entre 60 a 90% ($f_s=0,6$ a $0,9q_c$).

3 EXECUÇÃO DAS ESTACAS TESTE

Para a realização desta pesquisa foram executadas quatro estacas do tipo raiz, sendo três com diâmetro de 0,41 m e 12m de comprimento e uma com 0,31 m de diâmetro e 23m de comprimento. As estacas foram executadas em campo de acordo com as recomendações apresentadas pela ABEF (1999).

A seguir, na Tabelas 1 são apresentadas as características geométricas das estacas ensaiadas.

Tabela 1. Características geométricas das estacas ensaiadas.

Estaca	L(m)	ϕ (m)	U (m)	SL (m ²)
T1, T2 e T3	12	0,41	1,30	15,45
T4	23	0,31	0,97	22,31

Onde: L=comprimento da estaca, ϕ =diâmetro da estaca, U=perímetro da estaca, SL=área lateral da estaca.

As estacas foram executadas com argamassa industrializada (Nogueira, 2004). A pressão de ar comprimido empregada no adensamento da argamassa foi de 300 kPa. Os equipamentos utilizados para a execução das estacas teste foram: gerador de energia, perfuratriz rotativa

hidráulica sobre esteiras acionada por motor a diesel Cló-Zironi CR-12 com torre treliçada, bomba d'água, compressor de ar, bomba para a injeção da argamassa, conjunto extrator e dois conjuntos para acumulação de água (reservatórios).

As estacas teste foram dotadas de armadura longitudinal até uma profundidade de 4,0m que foram inseridas na escavação por auxílio de caminhão *Munck*. Na Tabela 2 são apresentadas as características da armadura utilizada.

Tabela 2. Características da armadura utilizada nas estacas

L (m)	Armadura longitudinal	Bitola do estribo	Diâmetro do estribo
12	6 ϕ 16 mm	6,3 mm	280 mm
23	7 ϕ 20 mm	6,3 mm	200 mm

Vale ressaltar que as estacas foram armadas somente até esta cota e não em seu comprimento total em função da presença de um tirante de aço que foi inserido no centro, ao longo de toda a estaca, colaborando este na resistência do elemento estrutural.

No interior de cada estaca teste ao longo de todo seu comprimento, foram inseridos seguimentos de tirantes de aço vazado de seção circular com diâmetro externo de 73 mm e interno de 44,5 mm com 6 m de comprimento em cada elemento. Estes tirantes foram dotados de rosca, o que auxiliou no emprego de luvas na solidarização de outros segmentos, além de incrementar a ancoragem destes na argamassa.

Na base dos tirantes, inseridos na escavação do fuste, foram instaladas luvas metálicas com aletas soldadas em sua base. Estas aletas objetivaram servir de “espaçadores e guias”, com o intuito de manter o tirante alinhado com o eixo da escavação do fuste. Na Figura 4 pode-se visualizar esta luva rosqueada na ponta do tirante.



Figura 4. Detalhe das aletas na ponta do tirante.

4 EXECUÇÃO DAS PROVAS DE CARGA

As provas de carga foram executadas em concordância com as recomendações da ABNT:NBR 12.131/1992. O sistema de carregamento utilizado consistiu de um macaco hidráulico com capacidade de 2000 kN e uma célula de carga montados sobre uma viga metálica projetada para suportar esforços de até 2000kN em sua parte central.

Esta viga é constituída por um perfil de aço duplo I, tendo comprimento de 5,30 m, altura de 0,75 m, largura de 0,80 m e peso equivalente a 35 kN. Para a observação dos recalques decorrentes em cada estágio de carregamento foram utilizados relógios comparadores com precisão de leitura de 0,01mm e curso de 50mm.

A montagem da prova de carga pode ser visualizada por meio do croqui representado na Figura 5.

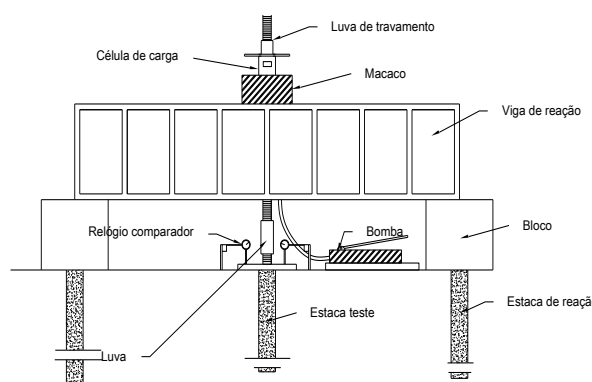


Figura 5. Croqui de montagem da prova de carga.

5 ESTIMATIVA DAS CARGAS DE RUPTURA POR MEIO DA CURVA CARGA vs RECALQUE

Para a estimativa das cargas de ruptura das estacas tracionadas foi utilizado o método de *Van der Veen* (1953).

Para as estacas com 12 m de comprimento foram calculadas as cargas de ruptura considerando-se que a prova de carga tenha sido interrompida em recalques situados em pontos referentes a 50, 60, 70, 80 e 90% da das cargas máximas obtidas pelas provas de carga que foram levadas até a ruptura. Este procedimento teve por objetivo avaliar a aplicabilidade deste

método caso a prova de carga fosse interrompida precocemente.

Para a estaca de 23m de comprimento, não foi efetuado o procedimento citado anteriormente, pois o ensaio não foi levado até a carga que representasse a ruptura devido a insuficiência do sistema de reação (tirante).

6 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES

6.1 Provas de carga executadas

Nas Tabelas 3 e 4 são apresentados os valores de carga de ruptura e recalques, respectivamente.

Tabela 3. Valores de carga última da prova de carga (PC) e respectivos valores aplicando fator de segurança 2 (PC/2).

Estaca	L (m)	PC (kN)	PC/2 (kN)
T1	12	910	455
T2	12	980	490
T3	12	910	455
T4	23	1300	650

Tabela 4. Recalques obtidos para as cargas PC e PC/2 por meio das provas de carga.

Estaca	L (m)	ρ_{PC} (mm)	$\rho_{PC/2}$ (mm)
T1	12	26,6	3,1
T2	12	45,3	2,5
T3	12	44,6	3,0
T4	23	26,4	5,5

Observando a Tabela 3 pode-se verificar que as estacas T1 e T3 apresentaram mesmos valores de carga de ruptura (PC), ou seja, 910kN. A estaca T2 apresentou carga de ruptura igual a 980kN, ou seja, 1,07 vezes superior às estacas T1 e T2.

O deslocamento vertical médio (recalque) para carga equivalente a PC/2 foi igual a 2,9mm, com desvio padrão de 0,32 e coeficiente de variação igual a 11%.

A carga obtida para a estaca T4 (1300kN) condiz ao máximo carregamento a esta imposta em função de limitações do sistema de reação. O deslocamento máximo observado para esta carga foi de 26,4mm.

6.2 Cargas de ruptura estimadas pelo Método de Van der Veen (1953)

A Tabela 5 apresenta as cargas de ruptura obtidas por meio do Método de *Van der Veen* (1953) considerando-se o máximo recalque obtido nas provas de carga (PVV_{PC})

Tabela 5. Cargas máximas estimadas por meio do método de *Van der Veen* (1953) considerando-se todos os pontos obtidos pelas provas de carga.

Estaca	PC (kN)	PVV_{PC} (kN)	PVV_{PC}/PC
T1	910	913	1,00
T2	980	980	1,00
T3	910	910	1,00
T4	1300*	1410	1,08

* carga máxima obtida em função da insuficiência do sistema de reação.

De acordo com a Tabela 5 observa-se que o valor de PVV_{PC}/PC médio foi de 1,02 com desvio padrão de 0,03 e coeficiente de variação de apenas 3%.

Nas Tabelas 6 a 10 são apresentadas as cargas de ruptura obtidas por meio do Método de *Van der Veen* (1953), considerando-se os 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.

Tabela 6. Cargas estimadas por meio do método de *Van der Veen* (1953) considerando-se até o recalque situado em 50% das cargas máximas atingidas pelas provas de carga.

Estaca	PC (kN)	$PVV_{50\%}$ (kN)	$PVV_{50\%}/PC$
T1	910	468	0,51
T2	980	496	0,50
T3	910	460	0,50

Tabela 7. Cargas estimadas por meio do método de *Van der Veen* (1953) considerando-se até o recalque situado em 60% das cargas máximas atingidas pelas provas de carga.

Estaca	PC (kN)	$PVV_{60\%}$ (kN)	$PVV_{60\%}/PC$
T1	910	594	0,65
T2	980	640	0,64
T3	910	594	0,65

Tabela 8. Cargas estimadas por meio do método de *Van der Veen* (1953) considerando-se até o recalque situado em 70% das cargas máximas atingidas pelas provas de carga.

Estaca	PC (kN)	$PVV_{70\%}$ (kN)	$PVV_{70\%}/PC$
T1	910	686	0,75
T2	980	765	0,78
T3	910	696	0,76

Tabela 9. Cargas estimadas por meio do método de *Van der Veen* (1953) considerando-se até o recalque situado em 80% das cargas máximas atingidas pelas provas de carga.

Estaca	PC (kN)	PVV _{80%} (kN)	PVV _{80%} /PC
T1	910	850	0,93
T2	980	862	0,88
T3	910	854	0,93

Tabela 10. Cargas estimadas por meio do método de *Van der Veen* (1953) considerando-se até o recalque situado em 90% das cargas máximas atingidas pelas provas de carga.

Estaca	PC (kN)	PVV _{90%} (kN)	PVV _{90%} /PC
T1	910	917	1,0
T2	980	980	1,0
T3	910	900	0,99

De uma maneira geral, de acordo com os parâmetros apresentados, pode-se verificar que o Método de *Van der Veen* (1953) apresentou valores de PVV/PC médios menores que a unidade ao se considerar pontos situados até recalques referentes a 50, 60, 70, 80% das cargas máximas obtidas pelas provas de carga.

A estaca T1 apresentou valor médio de PVV/PC considerando-se recalques equivalentes a 50, 60, 70, 80, 90% da carga de máxima obtida pela prova de carga, igual a 0,77 (*desvio padrão equivalente a 0,18, coeficiente de variação igual a 23,4% e desvios máximos e mínimos em relação à média equivalente a +0,23 e -0,16*).

A estaca T2 apresentou valor médio de PVV/PC, considerando-se recalques equivalentes a 50,60, 70, 80, 90% da carga de máxima obtida pela prova de carga, igual a 0,76 (*desvio padrão equivalente a 0,18, coeficiente de variação igual a 23,7% e desvios máximos e mínimos em relação à média equivalente a +0,24 e -0,16*).

A estaca T3 apresentou valor médio de PVV/PC, considerando-se recalques equivalentes a 50, 60, 70, 80, 90% da carga de máxima obtida pela prova de carga, igual a 0,77 (*desvio padrão equivalente a 0,18, coeficiente de variação igual a 23,4% e desvios máximos e mínimos em relação à média equivalente a +0,22 e -0,17*).

Ao se considerar o ponto referente aos recalques obtidos para as cargas máximas

obtidas pelas provas de carga, o método apresentou praticamente mesmo valor que o obtido pelos ensaios.

As Figuras seguintes apresentam os valores obtidos pela relação entre as cargas estimadas pelo método e as cargas máximas obtidas pelas provas de carga (PVV/PC) apresentadas pelas tabelas anteriores.

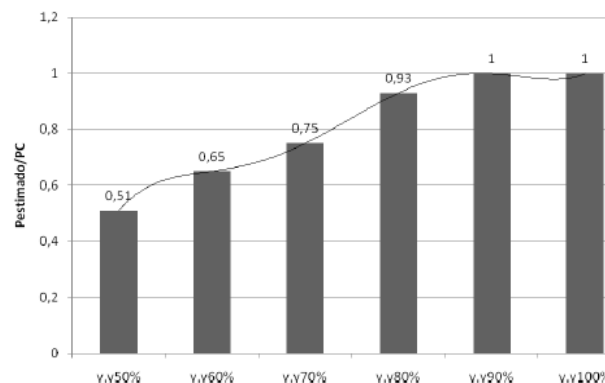


Figura 6. Valores de PVV/PC obtidos pelo método de *Van der Veen* (1953) obtidos para a estaca raiz T1.

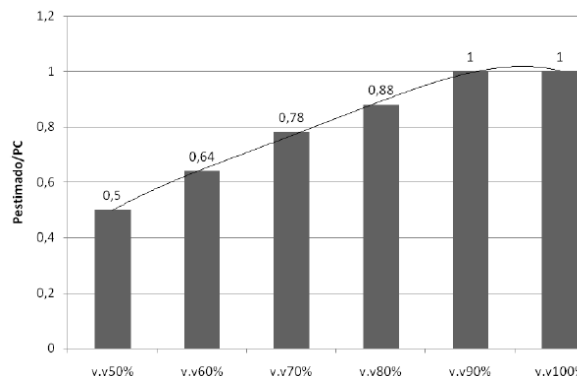


Figura 7. Valores de PVV/PC obtidos pelo método de *Van der Veen* (1953) obtidos para a estaca raiz T2.

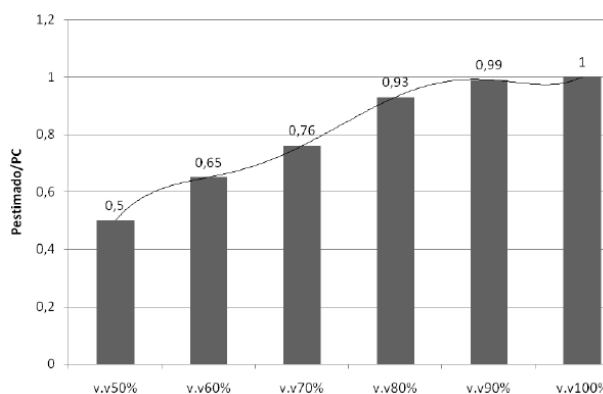


Figura 8. Valores de PVV/PC obtidos pelo método de *Van der Veen* (1953) obtidos para a estaca raiz T3.

De acordo com as Figuras apresentadas pode-se notar que os valores de PVV/PC tendem a se aproximar da unidade na medida

em que são considerados recalques mais próximos das cargas de ruptura obtidas pelas provas de carga.

6 CONCLUSÕES

Com base no que foi apresentado neste trabalho podem ser feitas as seguintes conclusões:

a) O método de *Van der Veen* (1953) apresentou para as estacas tracionadas estudadas valores satisfatórios de carga de ruptura estimados ao considerar nas análises os recalques máximos obtidos pelas provas de carga.

b) 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.

c) Os métodos para extrapolação de cargas de ruptura foram desenvolvidos inicialmente para estacas sujeitas a esforços de compressão, visto que após o esgotamento da resistência lateral ocorre uma lenta e progressiva mobilização da resistência de ponta. Quando as estacas são sujeitas a esforços de tração não existe componente de ponta, logo a validade dos métodos de extrapolação para o caso de estacas tracionadas ainda precisa de comprovação prática e de maiores estudos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as seguintes entidades que colaboraram na realização deste trabalho: Universidade Nove de Julho/SP (Uninove), Moretti Engenharia Consultiva Ltda, Fapesp e Votorantim Cimentos.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Empresas de Engenharia de Fundações e Geotecnia (1999). *Manual de Especificações e procedimentos*. São Paulo.282p...
- Albuquerque, P.J.R. (2001) *Estacas escavadas, hélice contínua e ômega: estudo do comportamento à compressão em solo residual de diabásio, através de provas de carga instrumentadas em profundidade*. Tese de Doutorado. Escola Politécnica / USP. São Paulo. 263p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR-12131/1992: Estacas-Ensaio de carga estática-Método de Ensaio*. Rio de Janeiro, ..
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR-6122/2010: Projeto e Execução de Fundações*. Rio de Janeiro,
- Massad, F. (1994) *Limites das extrapolações em provas de carga verticais, interrompidas prematuramente*. In: Cobramseg, X. Foz do Iguaçu. *Anais...* v.1; p.247-254.
- Nogueira, R.C.R. (2004) *Comportamento de estacas tipo raiz, instrumentadas, submetidas à compressão axial em solo de diabásio*. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 204p.
- Orlando, C. *Fundações submetidas a esforços verticais axiais de tração: Análise de provas de carga de tubulões em areias porosas*. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 235p..
- Orlando, C. (1999) *Contribuição ao estudo da resistência de estacas tracionadas em solos arenosos: Análise comparativa da resistência lateral na tração e na compressão*. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo,. 322p.
- Paschoalin Filho, J.A.; Albuquerque, P.J.R.; Carvalho, D.; Nogueira, R.C.R. (2008) *Comportamento à tração de estacas tipo raiz executadas em solo de diabásio, típico da região de Campinas, Brasil*. In: Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia, 4, 2008. Porto/Portugal. *Anais...*São Paulo, ABMS, cd rom.
- Paschoalin Filho, J.A. (2008) *Estudo do comportamento à tração axial de diferentes tipos de estacas executadas em solo de diabásio da região de Campinas* .425p. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 425p.
- Van der Veen, C. (1953) *The bearing capacity of a pile*. In: *Procedures of Third International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Zurich *Proceedings...*v.2 , p 84-90.