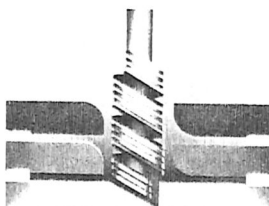


AB

MS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MECÂNICA DOS SOLOS

X CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES



X COBRAMSEF

Volume 1

Fundações e Interação Solo-Estrutura

SYSNO	0874924
PROD	0001305
ACERVO EESC	

Foz do Iguaçu, Novembro de 1994

0874924
090295



FINEP

FINANCIADORA DE ESTUDIOS E PROJETOS

ANÁLISE COMPARATIVA DA CARGA DE RUPTURA À TRAÇÃO EM ESTACAS

Nilton de Souza Campelo, Eng.¹

José Carlos A. Cintra, Dr.Sc.²

¹ Prof., Universidade do Amazonas

² Prof., Escola de Engenharia de São Carlos

X COBRAMSEF

RESUMO

Este artigo apresenta uma análise comparativa dos resultados obtidos em provas de carga à tração com os diversos métodos de previsão da capacidade de carga de estacas tracionadas. Os ensaios foram realizados no campo experimental de fundações do Departamento de Geotecnia da USP/São Carlos, sobre estacas apiloadas, escavadas do tipo broca e do tipo Strauss, com diâmetros de 20 a 32 cm, e comprimentos de 6 e 9 m. Observou-se que os métodos que consideram a ruptura na interface solo-estaca são os que conduzem a resultados mais satisfatórios, desde que os parâmetros geotécnicos do solo sejam determinados a partir de ensaios laboratoriais condizentes com as condições do solo *in situ*.

1. INTRODUÇÃO

A maioria dos métodos de previsão da capacidade de carga de fundações tracionadas originou-se de observações de testes em modelos, a partir da década de 1960. Alguns foram elaborados primordialmente para fundações rasas, como é o caso do método de Balla (1961), o de Vésic (1969, 71) e o de Meyerhof & Adams (1968); Meyerhof (1973) desenvolveu seu método para estacas e tubulões; o de Das (1983) surgiu para estacas com superfície rugosa em areias (sem a parcela de resistência devida a adesão); há aquele desenvolvido para qualquer tipo de fundação, rasas e profundas, com bom embasamento teórico, que é o da Universidade de Grenoble (Biarez & Barraud, 1968; Martin, 1966, 68, 73, entre outros).

Mas, há também, os métodos mais antigos, ainda muito utilizados: o do Tronco de Cone, que não considera a resistência ao cisalhamento mobilizada ao longo da superfície de ruptura, e o do Cilindro de Atrito, que pode ser abordado pela Teoria da Resistência Lateral, desde que se considere a superfície de ruptura ocorrendo na interação solo-estaca.

2. CARACTERIZAÇÃO DO SUBSOLO

Para a completa caracterização geotécnica do Campo Experimental foram realizados diversos ensaios em laboratório e *in situ*. Dentre esses últimos, realizaram-se cinco sondagens de simples reconhecimento (SPT) e cinco ensaios de penetração estática (CPT), até a profundidade de 20 m. Um poço de 10 m foi aberto, para retirada de amostras indeformadas, a cada metro e realização de ensaios laboratoriais.

O perfil típico obtido a partir das sondagens indica uma camada superficial de sedimento cenozóico, laterizada, porosa e colapsável. Separada por uma linha de seixos, situada à profundidade de 6 m, aparece logo abaixo o solo residual do Grupo Bauru, descrito como areia argilosa vermelha. O nível d'água foi encontrado a 10 m de profundidade, no inverno. A Tabela 1 apresenta os valores médios dos parâmetros geotécnicos do solo, utilizados para as previsões de carga última à tração, obtidos a partir de ensaios triaxiais drenados, às cotas de 6,3 e 9,3 m (Menezes, 1990). Maiores detalhes do campo experimental encontram-se em Cintra et al. (1991).

3. PROCEDIMENTOS E EQUIPAMENTOS DOS ENSAIOS

A metodologia adotada para as provas de carga foi a preconizada pelo MB-3472/91, utilizando-se células de carga aferidas, quatro extensômetros mecânicos com 50 mm de curso e precisão de 0,01 mm, um macaco hidráulico para cargas até 2000 kN e uma viga de reação, de elevada rigidez, constituída de dois perfis I de aço.

Nas estacas, foram realizados ensaios rápidos e ensaios lentos. Sacilotto (1992) concluiu que para o solo de São Carlos, não haveria diferença apreciável da curva carga versus deslocamento, para estacas escavadas e comprimidas, comparando-se ensaios lentos com rápidos.

A Tabela 2 apresenta o valor médio da carga máxima obtida nas provas de carga, para cada tipo de estaca, bem como o valor médio do ajuste das mesmas, através da equação de Van der Veen (1953).

4. MÉTODOS DE PREVISÃO DE CAPACIDADE DE CARGA À TRAÇÃO

A seguir, faz-se um comentário genérico sobre a aplicação dos diversos métodos de previsão da capacidade de carga à tração:

a) Método do Tronco de Cone: Adotou-se o ângulo da superfície de ruptura com a vertical (α) igual a 6° , 10° ($\phi/3$) e 15° ($\phi/2$); o primeiro valor é o encontrado por Carvalho (1991) para estacas escavadas, de relação L/D próximas às estacas em estudo, e no mesmo local; os dois últimos dizem respeito à faixa de valores geralmente recomendada, quando não se dispõe de resultados de provas de carga;

b) Teoria da Resistência Lateral: Considerou-se a superfície de ruptura ocorrendo na interação solo-estaca, aplicando-se a equação encontrada em Poulos & Davis (1980), para valores de coeficientes de empuxo em repouso ($K_0 = 1 - \sin \phi$), Meyerhof, (1976) e o encontrado por extrapolação, a partir de valores determinados por Carvalho (1991), para estacas de relação L/D semelhantes;

c) Método de Meyerhof (1973): Aqui há um melhor tratamento teórico para estacas e tubulões. Considerou-se a adesão (c_a) e o ângulo de atrito estaca-solo (δ) minorados por coeficientes, a

partir dos valores da coesão (c) e do ângulo de atrito interno do solo (ϕ), conforme sugestão de Potyondy (1961), para estacas escavadas, de paredes rugosas, em solo granular coesivo. No caso específico, $c_a = 0,80c$ e $\delta = 0,95\phi$;

d) Método de Das (1983): Determinou-se a carga última sem a adesão, conforme prescrição original, para estacas em areias, e com adesão, considerando a parcela devido a coesão do solo em estudo, conforme fizera Carvalho (1991);

e) Método de Grenoble: Utilizou-se o ângulo da superfície de ruptura com a vertical (λ) para os valores de $(-\phi/8)$, conforme recomendação do método original e 0, de acordo com sugestão posterior de vários autores (Danziger, 1983; Orlando, 1985; Matos, 1989; Carvalho, 1991).

A Tabela 3 mostra as cargas últimas à tração previstas pelos diferentes métodos, com as diversas hipóteses consideradas nos cálculos das mesmas, e os respectivos erros (%) em relação às provas de carga.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Figura 1 apresenta as curvas carga x deslocamento encontradas nas provas de carga, para as cinco estacas.

Na Tabela 4, são mostrados os deslocamentos das estacas para 50% e 90% da carga de ruptura, observando-se que os deslocamentos são bastante reduzidos, na carga de trabalho (Danziger, 1983; Orlando, 1985; Matos, 1989; Carvalho, 1991). Verifica-se que os deslocamentos médios, na carga de serviço, crescem com a relação L/D , desde 0,04%, para as médias das estacas escavadas ($L/D=24$), até 2,7%, média das estacas apiloadas.

A Tabela 5 apresenta os valores médios dos parâmetros utilizados nas previsões de carga última, obtidos por retroanálise.

A Tabela 6 mostra o atrito lateral total médio (f_s) de cada tipo de estaca.

6. CONCLUSÕES

Do exposto, pode-se concluir o seguinte:

1) Os deslocamentos médios, na carga de trabalho, apresentaram-se bastante reduzidos, com valores médios de 2,7%, 0,04% e 0,25% do diâmetro, para as estacas apiloadas, escavadas e Strauss, respectivamente, crescendo com a relação L/D da estaca;

2) Os modelos de ruptura que melhor se adaptaram aos resultados experimentais são os que consideram superfície de ruptura cilíndrica, na interface solo-estaca, como é o caso dos métodos da Teoria da Resistência Lateral, Grenoble, e o de Das (com a parcela de adesão incluída);

3) O método do Tronco de Cone mostrou-se muito dispersivo, ora conservador, ora contra a segurança, mesmo utilizando-se ângulo α próximo ao encontrado por Carvalho (1991), para estacas de relação L/D semelhantes;

4) Os valores de c_a e δ , conforme preconizado por Potyondy (1961), levam a resultados satisfatórios, principalmente nos métodos que consideram ruptura na interface solo-estaca;

5) Pela retroanálise efetuada, considerando valores médios obtidos, o método de Meyerhof (1973) conduzirá a bons resultados se K_u for minorado para valores próximos ao coeficiente K_0 ; analogamente, a Teoria da Resistência Lateral propiciará melhores resultados se o coeficiente de empuxo lateral a ser adotado for também próximos ao de repouso;

6) O método de Grenoble apresentou bons resultados, considerando ruptura pela interface ($\lambda = 0$); mas para $\lambda = -\phi/8$, o método conduziu a resultados contra a segurança;

7) O método de Das (1983), desde que acrescido da parcela devida à adesão estaca-solo, fornece também bons resultados de previsão de carga última. Pela média obtida, o coeficiente K_u demonstrou ser coerente com o preconizado por Meyerhof (1973).

8) O atrito lateral total médio das estacas apiloadas e escavadas, na carga de ruptura ajustada, situa-se próximo ao encontrado por Monteiro (1985) e Carvalho & Souza (1990), iguais a 26 e 30 kN/m², respectivamente, para estacas moldadas in loco, em Ilha Solteira, SP.

7. TABELAS E FIGURAS

Tabela 1. Valores Médios dos Parâmetros do Solo (Menezes, 1990).

Prof. (m)	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)
6,30	16,4	9,3	29,2
9,30	17,5	9,7	28,0

Tabela 2. Características Geométricas, Média das Cargas Máximas de Ensaio e das Cargas Últimas.

Estaca	D (m)	L (m)	$P_{m\acute{a}x.}$ (kN)	P_u (kN)
Apiloadada	0,20	6,0	84	92,5
Escavada	0,25	6,0	123,5	130,5
Strauss	0,32	9,0	390	410

Tabela 3. Carga Última à Tração Prevista (kN) e Erro (%) em Relação às Provas de Carga.

Estaca	Tronco de Cone			Meyerhof
	$\alpha=6^\circ$	$\alpha=10^\circ$	$\alpha=15^\circ$	
Apiloadada	68 (+26)	156 (-69)	324 (-250)	169 (-83)
Escavada	77 (+41)	168 (-29)	340 (-161)	255 (-95)
Strauss	252 (+39)	571 (-39)	1180 (-188)	582 (-42)

Tabela 3 (Cont.). Carga Última à Tração Prevista (kN) e Erro (%) em Relação à Prova de Carga.

Estaca	Teoria da Res. Lateral		Das		Grenoble	
	K=K ₀	K=0,68	(c _a =0)	(c _a)	$\lambda = (-\phi / 8)$	$\lambda = 0$
Apiloadada	81 (+12)	99 (-7)	50 (+46)	79 (+15)	263 (-184)	104 (-12)
Escavada	118 (+10)	146 (-12)	76 (+42)	111 (+15)	292 (-124)	132 (-1)
Strauss	290 (+29)	346 (+16)	183 (+55)	253 (+38)	850 (-107)	366 (+11)

Tabela 4. Deslocamentos para 50% e 90% da Carga Última.

Estaca	ρ_{50} (mm)	ρ_{90} (mm)
Apiloadada	5,4	41,0
Escavada	0,1	31,1
Strauss	0,8	24,9

Tabela 5. Retroanálise dos Parâmetros Utilizados na Previsão das Cargas Últimas à Tração.

		Tr. de Cone	Meyerhof	Das
Estaca	P _u (kN)	α (°)	K _u	K _u
Apiloadada	92,5	7,5	0,61	1,31
Escavada	130,5	8,5	0,58	1,28
Strauss	410,0	8,0	0,85	1,72

Tabela 6. Atrito Lateral Total Médio para as Estacas Ensaaiadas.

Estaca	Atrito Lateral Total Médio (fs) (kN/m ²)
Apiloadada	24,2
Escavada	27,7
Strauss	45,3

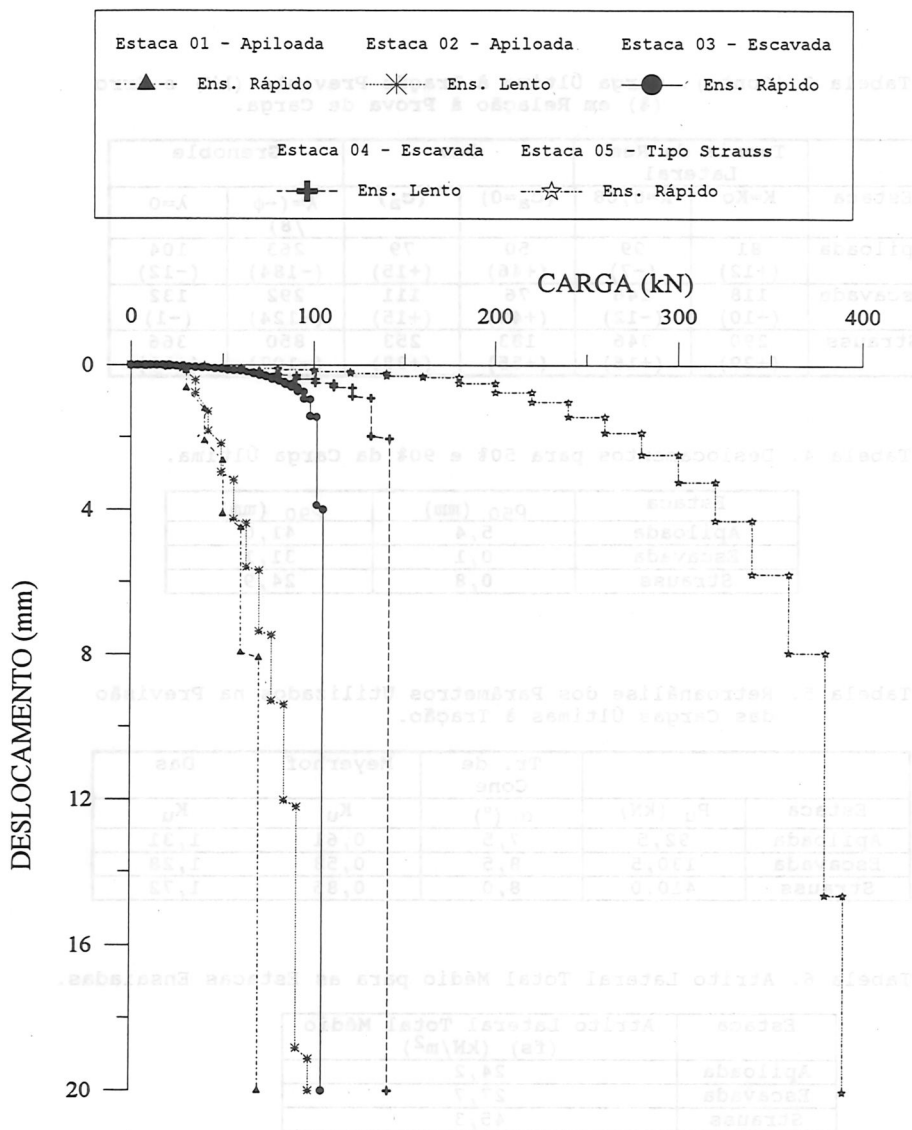


Figura 1. Curvas Carga x Deslocamento das Estacas

8. BIBLIOGRAFIA

1. ABNT/MB-3472. (1991). Estacas - Prova de carga estática.
2. BIAREZ, J. & BARRAUD, Y. (1968). Adaptation des fondations de pilones au terrain par les méthodes de la Mécanique des sols.
3. CARVALHO, D. (1991). Análise de cargas últimas à tração de estacas escavadas, instrumentadas, em campo experimental de São Carlos - SP. Tese de doutouramento, USP/São Carlos, 204 p.
4. CARVALHO, D. & SOUZA, A. (1990). Análise do efeito do umedecimento do solo em fundações rasas e profundas, em solos porosos. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, 6., Salvador, (2): 107-114.
5. CINTRA, J.C.A.; CARVALHO, D.; GIACHETTI, H.L.; BORTOLUCCI, A.A. & ALBIERO, J.H. (1991). Campo experimental de fundações em São Carlos. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais, 2., São Paulo, (1): 96-105.
6. DANZIGER, F.A.B. (1983). Capacidade de carga de fundações submetidas a esforços verticais de tração. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, 331 p.
7. DAS, B.J. (1983). A procedure for estimation of uplift capacity of rough piles. *Soils and Foundations*, 17 (3): 72-77.
8. MARTIN (1973). Calcul des pieux et fondations à dalle des pylones de transport d'énergie électrique. Etude théorique et resultats d'essais en laboratoire et *in-situ*. *Annales de L'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publies*, (307-308): 105-130, juillet-aout.
9. MATOS, L.F.S. (1989). Pesquisa experimental da resistência ao arrancamento de estacas escavadas de pequeno diâmetro, num solo parcialmente saturado. Dissertação de Mestrado, CPGEC/UFRGS, 132 p.
10. MEYERHOF, G.G. (1973). Uplift resistance of inclined anchors and piles. In: *International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering*, 8, Moscou. *Proceedings*, (2): 167-172.
11. MEYERHOF, G.G. (1976). Bearing capacity and settlement of pile foundations. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 102 (3): 195-228.
12. MONTEIRO, L.B. (1985). Alguns aspectos da capacidade de carga de solos colapsíveis. In: *Seminário de Engenharia de Fundações Especiais*, 1., São Paulo, (2): 193-202.
13. ORLANDO, C. (1985). Fundações submetidas a esforços verticais axiais de tração. Análise de provas de carga de tubulões em areias porosas. Dissertação de Mestrado, E.P./USP, 235 p.
14. POTYONDY, J.G. (1961). Skin friction between various soils and construction materials. *Géotechnique*, 11 (4): 339-353.
15. POULOS, H.G. & DAVIS, E.H. (1980). *Pile foundation analysis and design*. New York, Wiley, 1980.

16. SACILOTTO, A.C. (1992). Comportamento de estacas escavadas instrumentadas, submetidas à provas de carga lentas e rápidas. Dissertação de mestrado, USP/São Carlos, 163 p.

17. TEIXEIRA, C.Z. (1993). Comportamento de estacas escavadas em solos colapsíveis. Dissertação de Mestrado, USP/São Carlos, 157 p.

18. VAN DER VEEN (1953). The bearing capacity of a pile. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 3., Zurich, (2): 84-90.