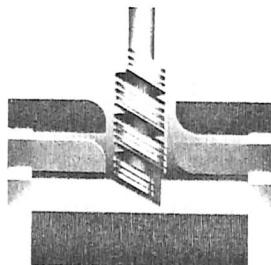


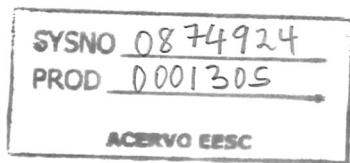
**X CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS  
E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES**



**X COBRAMSEF**

**Volume 1**

Fundações e Interação Solo-Estrutura



Foz do Iguaçu, Novembro de 1994

0874924  
090295

# ANÁLISE COMPARATIVA DA CARGA DE RUPTURA À TRAÇÃO EM ESTACAS

Nilton de Souza Campelo, Eng.<sup>1</sup>

José Carlos A. Cintra, Dr.Sc.<sup>2</sup>

X COBRAMSEF

<sup>1</sup> Prof., Universidade do Amazonas

<sup>2</sup> Prof., Escola de Engenharia de São Carlos

## 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 de carga à tração:

a) Método do Tronco de Cone: Adotou-se o ângulo da superfície de ruptura com a vertical ( $\alpha$ ) igual a  $6^\circ$ ,  $10^\circ$  ( $\phi/3$ ) e  $15^\circ$  ( $\phi/2$ ); 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 ( $K_0=1-\text{sen}\phi'$ , 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 ( $\delta$ ) minorados por coeficientes, a

partir dos valores da coesão ( $c$ ) e do ângulo de atrito interno do solo ( $\phi$ ), 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 devida 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 ( $\lambda$ ) 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  $\alpha$  próximo ao encontrado por Carvalho (1991), para estacas de relação L/D semelhantes;

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

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/m<sup>2</sup>, 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)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	c (kPa)	$\phi$ (°)
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 <sub>máx.</sub> (kN)	P <sub>u</sub> (kN)
Apiloadas	0,20	6,0	84	92,5
Escavadas	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
	$\alpha=6^\circ$	$\alpha=10^\circ$	$\alpha=15^\circ$	
Apiloadas	68 (+26)	156 (-69)	324 (-250)	169 (-83)
Escavadas	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.

	Teoria da Res. Lateral		Das		Grenoble	
	K=Ko	K=0,68	(c <sub>a</sub> =0)	(c <sub>a</sub> )	$\lambda = (-\phi /8)$	$\lambda = 0$
Estaca						
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	$\rho_{50}$ (mm)	$\rho_{90}$ (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.

Estaca	$P_u$ (kN)	Tr. de Cone	Meyerhof	Das
		$\alpha$ ( $^{\circ}$ )	$K_u$	$K_u$
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 Ensaiadas.

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

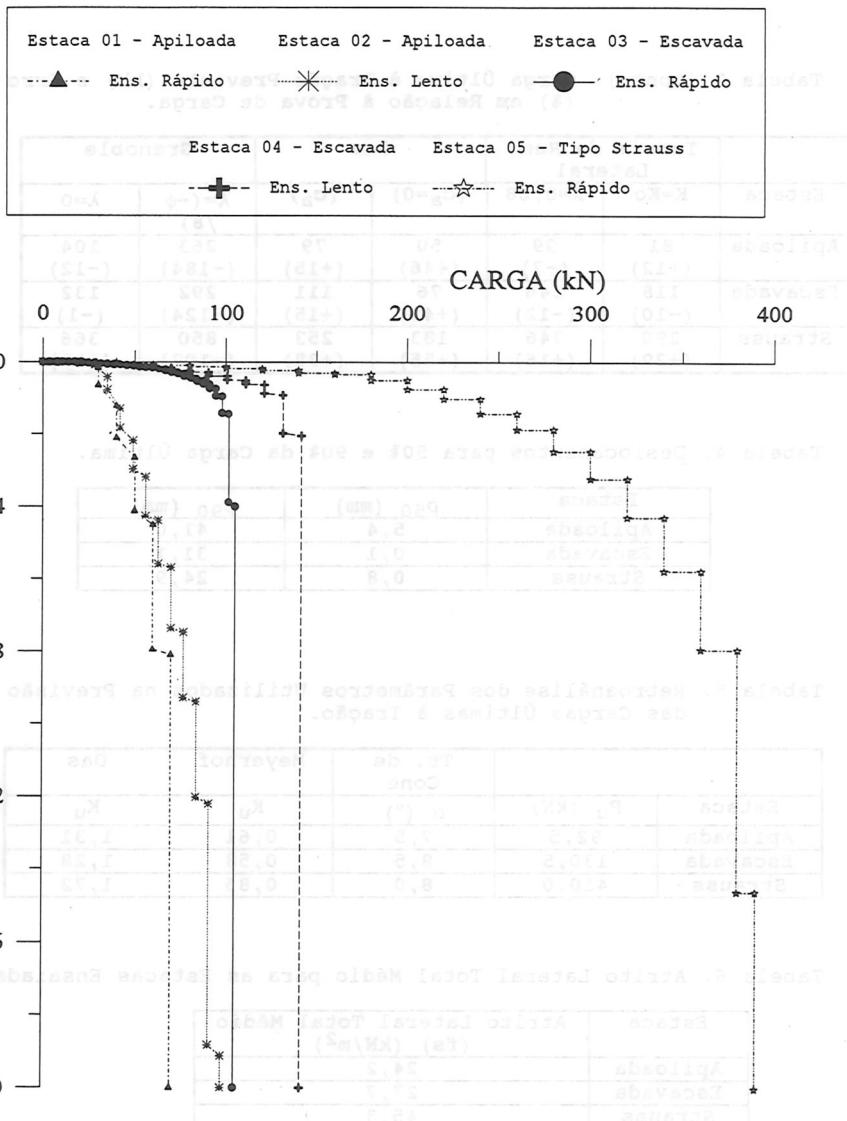


Figura 1. Curvas Carga x Deslocamento das Estacas

**8. BIBLIOGRAFIA**

1. ABNT/MB-3472. (1991). Estacas - Prova de carga estática.
2. BIAREZ, J. & BARRAUD, Y. (1968). Adaptation des fondations de pilons 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 doutoramento, 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.; GIACHETI, 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 pylônes de transport d'énergie électrique. Etude théorique et résultats d'essais en laboratoire et *in-situ*. Annales de L'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, (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, CPGECE/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 tubulações 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. SACIOTTO, 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.

19. VASCONCELOS, J. (1992). Análise da resistência de estacas em solos na transição entre o solo de fundação e o solo de escavação. Tese de Mestrado, UFSCar, São Paulo, 100 p.

20. VASCONCELOS, J. (1993). Análise da resistência de estacas em solos na transição entre o solo de fundação e o solo de escavação. Tese de Mestrado, UFSCar, São Paulo, 100 p.

21. VASCONCELOS, J. (1994). Análise da resistência de estacas em solos na transição entre o solo de fundação e o solo de escavação. Tese de Mestrado, UFSCar, São Paulo, 100 p.

22. VASCONCELOS, J. (1995). Análise da resistência de estacas em solos na transição entre o solo de fundação e o solo de escavação. Tese de Mestrado, UFSCar, São Paulo, 100 p.

23. VASCONCELOS, J. (1996). Análise da resistência de estacas em solos na transição entre o solo de fundação e o solo de escavação. Tese de Mestrado, UFSCar, São Paulo, 100 p.

24. VASCONCELOS, J. (1997). Análise da resistência de estacas em solos na transição entre o solo de fundação e o solo de escavação. Tese de Mestrado, UFSCar, São Paulo, 100 p.

25. VASCONCELOS, J. (1998). Análise da resistência de estacas em solos na transição entre o solo de fundação e o solo de escavação. Tese de Mestrado, UFSCar, São Paulo, 100 p.

26. VASCONCELOS, J. (1999). Análise da resistência de estacas em solos na transição entre o solo de fundação e o solo de escavação. Tese de Mestrado, UFSCar, São Paulo, 100 p.

27. VASCONCELOS, J. (2000). Análise da resistência de estacas em solos na transição entre o solo de fundação e o solo de escavação. Tese de Mestrado, UFSCar, São Paulo, 100 p.

28. VASCONCELOS, J. (2001). Análise da resistência de estacas em solos na transição entre o solo de fundação e o solo de escavação. Tese de Mestrado, UFSCar, São Paulo, 100 p.

29. VASCONCELOS, J. (2002). Análise da resistência de estacas em solos na transição entre o solo de fundação e o solo de escavação. Tese de Mestrado, UFSCar, São Paulo, 100 p.

30. VASCONCELOS, J. (2003). Análise da resistência de estacas em solos na transição entre o solo de fundação e o solo de escavação. Tese de Mestrado, UFSCar, São Paulo, 100 p.

31. VASCONCELOS, J. (2004). Análise da resistência de estacas em solos na transição entre o solo de fundação e o solo de escavação. Tese de Mestrado, UFSCar, São Paulo, 100 p.