

OBTENÇÃO DE PARÂMETROS NO PROBLEMA DA ESTACA CAR- REGADA LATERALMENTE: UM PROGRAMA PARA CALCULADORA

*José Carlos Angelo Cintra **

José Henrique Albiero

RESUMO

Apresenta-se um programa para a calculadora HP-34 C, elaborado de uma maneira tal que também possa ser utilizado na HP-67 com pequenas adaptações, para geração de parâmetros no problema da estaca carregada lateralmente. A sistemática adotada encontra-se no artigo de CINTRA e ALBIERO (1982) e constitui uma generalização do trabalho de ALIZADEH e DAVISSON (1970).

Comprova-se a recomendação de DAVISSON e ROBINSON (1965), através da análise de provas de carga lateral em estacas.

Julgou-se interessante alterar a notação original dos autores, obedecendo à proposta de uniformização de CINTRA (1981).

1. OBTENÇÃO DE PARÂMETROS

Na prática de engenharia, têm sido amplamente utilizados para o cálculo de estacas carregadas lateralmente, os métodos baseados na teoria de reação horizontal do solo. Porém, pequena atenção tem sido dada à obtenção dos parâmetros envolvidos no problema, geralmente adotando-se valores conservativos indicados na literatura técnica especializada.

Por isso, considera-se importante a contribuição de ALIZADEH e DAVISSON (1970), onde são analisadas provas de carga lateral aplicada à superfície em estacas instaladas em solo arenoso.

Generalizando o procedimento destes autores, analisam-se provas de carga lateral ensaiadas no Polo Peroquímico de Camaçari-Ba após uma escavação do solo superficial, de modo que a aplicação da carga na cabeça da estaca produzia momento fletor à superfície. O solo é essencialmente arenoso, o que permite a hipótese de se considerar a variação linear do módulo de reação horizontal do solo (K) com a profundidade (Z):

$$K = n_h z$$

onde n_h é o coeficiente de reação horizontal do solo.

Devido ao procedimento utilizado nos ensaios de Camaçari, portanto, foram medidos os deslocamentos y_i da cabeça da estaca que estava situada

* Professores de Fundações da Escola de Engenharia de São Carlos — U.S.P.

ESTACAS CARREGADAS LATERALMENTE

acima da superfície do terreno (após a escavação). Isto exige a obtenção dos correspondentes deslocamentos y_o à superfície em cada estágio da prova.

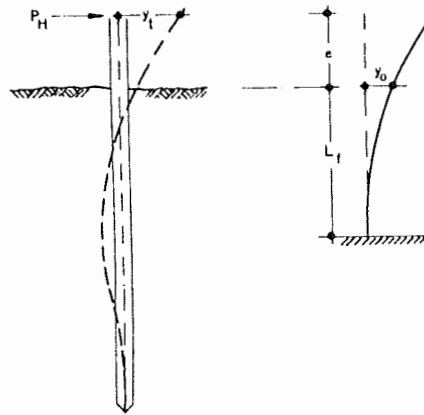


Figura 1 — GEOMETRIA DO PROBLEMA

1.1 — Determinação de y_o

Considera-se a hipótese de que a estaca esteja engastada a uma profundidade L_f a partir da superfície do terreno (Fig. 1). Igualando-se o deslocamento y_t da cabeça da estaca, obtido na prova de carga (condição real), com a flecha calculada pela Resistência dos Materiais para uma estaca de comprimento $e + L_f$ engastada na ponta (condição equivalente), pode-se determinar a profundidade de engastamento L_f :

$$L_f = \sqrt[3]{\frac{3 E I y_t}{P_H}} - e$$

onde P_H = carga lateral aplicada

E = módulo de elasticidade da estaca

I = momento de inércia da estaca

e = distância da cabeça da estaca à superfície do terreno

ESTACAS CARREGADAS LATERALMENTE

Em seguida, obtém-se o deslocamento y_o à superfície

$$y_o = \frac{y_t}{2} \left[2 - \frac{3e}{e + L_f} + \left(\frac{e}{e + L_f} \right)^3 \right]$$

Assim, pode-se traçar a curva derivada $P_H \times y_o$ para cada prova de carga. Finalmente, passa-se à determinação do gráfico $n_h \times y_o$ para cada prova.

1.2 — Determinação da curva $n_h \times y_o$

Por tentativas, determina-se o valor de T (fator de rigidez relativa estaca-solo) que satisfaz a equação de MATLOCK e REESE (1961):

$$y_o = 2,345 P_H \frac{T^3}{EI} + 1,623 (P_H e) \frac{T^2}{EI}$$

Como, por definição, tem-se que

$$T = \sqrt[5]{\frac{EI}{n_h}}$$

então chega-se a

$$n_h = \frac{EI}{T^5}$$

o que permite construir a curva $n_h \times y_o$ para cada prova.

1.3 — Análise das Curvas $n_h \times y_o$

Através da análise das curvas $n_h \times y_o$, CINTRA e ALBIERO (1982) encontram $n_h = 85 \text{ MN/m}^3$ como valor para projeto. Esta análise generaliza o procedimento de ALIZADEH e DAVISSON (1970).

Ressalte-se que o valor de n_h assim determinado propicia uma concordância muito boa entre os deslocamentos y_o derivados das provas de cargas e os previstos pelos vários métodos da teoria de reação horizontal do solo, segundo CINTRA e ALBIERO (1983).

2. PROFUNDIDADE DE ENGASTAMENTO

Para estacas em solos arenosos, DAVISSON e ROBINSON (1965) recomendam a utilização de uma profundidade de engastamento $L_f = 1,80 T$,

ESTACAS CARREGADAS LATERALMENTE

com a qual a condição equivalente de estaca engastada representaria muito bem a condição real.

Isto está compatível com os resultados da CINTRA (1981) que, para as várias provas de carga, encontrou uma variação de $L_f = 1,83$ a $1,92 T$. Observe a Tabela 1, onde se mostra uma dessas provas, na última coluna.

3. PROGRAMA PARA CALCULADORA

Para os cálculos citados, elaborou-se um programa para a calculadora HP-34 C (ou HP-67). Como o programa envolve o cálculo de T por tentativas, é necessário fornecer um intervalo de variação para T : um limite inferior T_a e um limite superior T_b ; assim como fixar um erro e de comparação para y_0 .

O programa tem 122 passos, utiliza 10 memórias, e pode ser dividido em duas partes distintas:

A primeira parte (até o passo 12) é constante para todos os estágios de uma mesma prova de carga e tem os seguintes comandos de entrada:

E (MN/m²) STO 0
 e (m) STO 1
 c STO 2
 D (m) ENTER
 A

A segunda parte tem, inicialmente, como entrada os valores característicos de cada estágio

P_H (kN) STO 3
 y_t (mm) STO 4
 B

Após o cálculo do valor de y_0 , mostrado no visor, programa se interrompe (no passo 70), com os seguintes valores registrados:

L_f (m) Registro 8
 y_0 (mm) Registro 4

Em seguida, é necessário entrar com o intervalo de variação para T :

T_a (m) STO 5
 T_b (m) STO 6
 R/S

ESTACAS CARREGADAS LATERALMENTE

Após a interação, finalmente, o programa se encerra mostrando o valor de n_h , com os seguintes valores registrados:

T (m) Registro 7
 L_f/T Registro 8
 n_h (MN/m³) Registro 9

A seguir, apresenta-se a listagem completa do programa para a HP-34 C. Entre parênteses estão os comandos adaptados para a HP-67.

001. h LBL A (f LBL A)	037. 2
002. 4	038. +
003. h y ^x	039. STO 6
004. h π	040. RCL 5
004. ×	041. 3
006. 6	042. ×
007. 4	043. CHS
008. ÷	044. RCL 6
009. RCL 0	045. +
010. ×	046. RCL 4
011. STO 0	047. ×
012. h RTN	048. 2
013. h LBL B (f LBL B)	049. ÷
014. RCL 3	050. STO 4
015. RCL 0	051. RCL 3
016. ÷	052. 2
017. STO 3	053. .
018. h 1/x	054. 4
019. 3	055. 3
020. ×	056. 5
021. RCL 4	057. ×
022. ×	058. STO 9
023. 3	059. RCL 3
024. h 1/x	060. RCL 1
025. h y ^x	061. ×
026. STO 5	062. 1
027. RCL 1	063. .
028. -	064. 6
029. STO 8	065. 2
030. h PSE (h PAUSE)	066. 3
031. RCL 1	067. ×
032. RCL 5	068. STO 3
033. ÷	069. RCL 4
034. STO 5	070. R/S
035. 3	071. h LBL 1 (f LBL 1)
036. h y ^x	072. h CF 0

ESTACAS CARREGADAS LATERALMENTE

073.	RCL 6	098.	RCL 7
074.	RCL 5	099.	÷
075.	+	100.	STO 8
076.	2	101.	h PSE (h PAUSE)
077.	÷	102.	RCL 7
078.	STO 7	103.	5
079.	h PSE (h PAUSE)	104.	h y^x
080.	GSB 3 (f GSBf C)	105.	h $1/x$
081.	RCL 4	106.	RCL 0
082.	f $x > y$ (g $x > y$)	107.	×
083.	h SF 0	108.	STO 9
084.	—	109.	h RTN
085.	h ABS	110.	h LBL 3 (f LBL C)
086.	RCL 2	111.	RCL 7
087.	f $x > y$ (g $x > y$)	112.	g x^2
088.	GTO 2	113.	RCL 3
089.	6	114.	×
090.	STO f 1 (h ST 1)	115.	RCL 7
091.	h F? 0	116.	3
092.	g DSE (f DSZ)	117.	h y^x
093.	RCL 7	118.	RCL 3
094.	STO f (i) (STO (i))	119.	×
095.	GTO 1	120.	+
096.	h LBL 2 (f LBL 2)	121.	h PSE (h PAUSE)
097.	RCL 8	122.	h RTN

5. EXEMPLO

Em uma das provas de carga executadas, nº 4, a estaca nº 160-ELETROLISE 2ª parte, do tipo Franki, apresentava as seguintes características geométricas:

$$D = 520 \text{ mm (diâmetro)}$$

$$e = 1,30 \text{ m}$$

$$L = 5,50 \text{ m (comprimento enterrado)}$$

Adotou-se o valor corrente de $E = 25.000 \text{ MN/m}^2$ para o módulo de elasticidade deste tipo de estaca, fixou-se um erro de comparação $\epsilon = 0,001$ e utilizaram-se intervalos variáveis para T mas sempre compreendidos entre 0 e 2 m.

Com os valores de $P_H \times y_t$ dos estágios deste ensaio, a utilização do programa forneceu os seguintes resultados mostrados na Tabela 1:

ESTACAS CARREGADAS LATERALMENTE

TABELA 1 — PROVA DE CARGA Nº 4

P_H (kN)	y_t (mm)	L_f (m)	y_0 (mm)	T (m)	η_h (MN/m ³)	L_f/T
13,0	0,50	0,88	0,11	0,47	3.835	1,86
26,0	1,30	1,08	0,34	0,58	1.389	1,87
39,0	2,30	1,21	0,67	0,65	783	1,87
52,0	3,30	1,28	1,01	0,68	611	1,87
65,0	6,60	1,71	2,59	0,91	144	1,88
78,0	8,20	1,75	3,27	0,93	130	1,88
91,0	12,00	1,99	5,25	1,05	69	1,89
97,5	14,92	2,15	6,89	1,14	47	1,89

6. BIBLIOGRAFIA

- ALIZADEH, M. e DAVISSON (1970) — "Lateral Load Test on Piles — Arkansas River Project", Journal of the Soil Mech. and Foundations Division, ASCE, Vol. 96, nº SM 5, pp. 1.583 — 1.604.
- CINTRA, J. A. (1981) — "Uma Análise de Provas de Carga Lateral em Estacas Comparação com os Métodos da Teoria de Reação Horizontal do Solo", dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos-USP, para obtenção do título de Mestre em Geotecnia, 150 p.
- CINTRA, J. C. A. e ALBIERO, J. H. (1982) — "Determinação do Coeficiente de Reação Horizontal do Solo (η_h) Através de Provas de Carga Lateral em Estacas", Anais do VII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Olinda/Recife-PE, Vol. II, pp. 123-138.
- CINTRA, J. C. A. e ALBIERO, J. H. (1983) — "Comparação entre Resultados Derivados de Provas de Cargas Lateral em Estacas e Métodos da Teoria de Reação Horizontal do Solo", (inédito).
- DAVISSON, M. T. e ROBINSON, K. E. 1965) — "Bending and Buckling of Partially Embedded Piles", Proc. Sixth Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Montreal, Vol. 2, pp. 243-246.
- MATLOCK, H. e REESE, L. C. (1961) — "Foundation Analysis of Offshore Pile Supported Structures", Proc. Fifth Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Paris, Vol. 2, pp. 91-97.
- REESE, L. C. (1981) — "Behavior of Deep Foundations Under Axial and Lateral Loading", Curso de Atualização, FDTE/EPUSP/IPT, São Paulo, Notas de Aula.
- TERZAGHI, K. (1953) — "Evaluation of Coefficients of Subgrade Reaction", Géotechnique, The Institution of Civil Engineers, Vol. 5, nº 4, Dez., pp. 297-326.

Consultem sobre o programa

ESTAC

Para cálculo de conjunto de estacas no caso mais geral, na HP-41C (veja artigo neste número).