

DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE REAÇÃO HORIZONTAL DO SOLO (n_h) ATRAVÉS DE PROVAS DE CARGA LATERAL EM ESTACAS

JOSÉ CARLOS ÂNGELO CINTRA, M.Sc.

• Prof^o Assistente de Fundações e de Mecânica dos Solos da Escola de Engenharia de São Carlos – USP

JOSÉ HENRIQUE ALBIERO, Ph. D.

• Prof^o de Fundações (graduação e pós-graduação) da Escola de Engenharia de São Carlos – USP

RESUMO

São analisadas seis provas de carga lateral em estacas ensaiadas no Polo Petroquímico de Camaçari-BA após uma escavação do solo superficial, de modo que a aplicação da carga lateral na cabeça da estaca produzisse momento fletor à superfície. O solo é essencialmente arenoso, o que permite a hipótese de considerar a variação linear do módulo de reação horizontal do solo (K) com a profundidade (z):

$$K = n_h z$$

São estabelecidas as curvas coeficiente de reação horizontal do solo $\times$ deslocamento horizontal à superfície ($n_h \times y_o$), uma para cada prova de carga, com o objetivo de se adotar o parâmetro n_h para projeto.

A sistemática adotada constitui uma generalização do trabalho de ALIZADEH e DAVISSON (1970). A notação utilizada obedece a proposta de uniformização de CINTRA (1981).

1 - PERFIL DO SUBSOLO

Analisando as sondagens, pode-se estabelecer um perfil típico (Figura 1), distinguindo-se três camadas distintas de areia fina e média siltosa: uma camada superficial, de espessura de cerca de 3m e de índice de resistência à penetração (SPT) médio de 2 golpes; uma camada intermediária, de espessura da ordem de 8m e índice de resistência à penetração médio de 10 golpes; e uma terceira camada, com valores de SPT de 35 golpes ou mais. O nível d'água não foi alcançado.

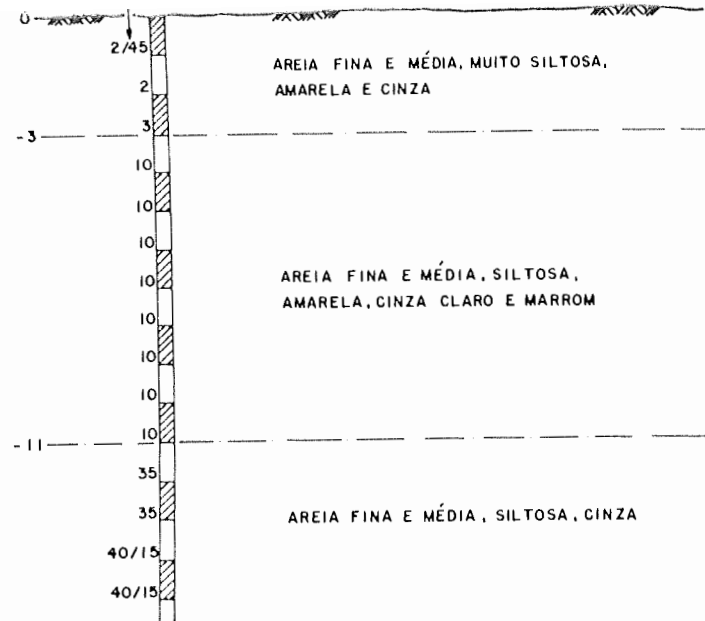


Figura 1 - PERFIL TÍPICO (CAMAÇARI-BA)

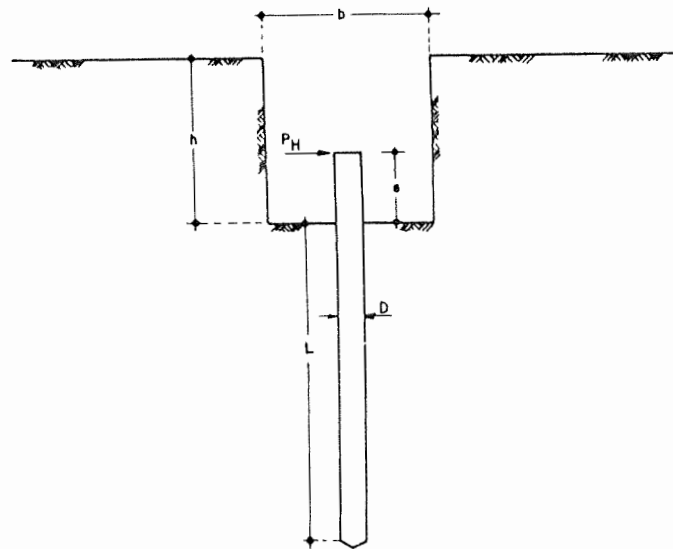


Figura 2 — ESQUEMA GEOMÉTRICO DAS PROVAS DE CARGA

As provas de carga disponíveis, em número de 6(seis), foram ensaiadas em estacas do tipo Franki (estacas 1 a 5) e do tipo escavado (estaca 6), de diâmetros compreendidos entre 400 e 700 mm (Tabela 1).

A Figura 2 mostra um esquema do ensaio, enquanto a Tabela 1 apresenta os respectivos dados geométricos de todas as provas de carga.

As cargas e deslocamentos máximos obtidos nas provas de carga es
tão indicados na Tabela 2.

TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DAS PROVAS

PROVA	ESTACA Nº	D (mm)	h (m)	b (m)	e (m)	L (m)
1	391-REDUÇÃO 120-170	400	2,65	2,00	0,90	4,60
2	50-REDUÇÃO 120-180	400	2,90	1,70	1,00	7,80
3	109-ELETROLISE 2ª PARTE	520	2,00	3,20	1,40	7,10
4	160-ELETROLISE 2ª PARTE	520	3,70	3,20	1,30	5,50
5	E145-REDUÇÃO 120-170	520	3,50	3,20	1,20	6,90
6	606-ELETROLISE 2ª PARTE	700	4,40	3,20	0,70	11,20

TABELA 2 — CARGA E DESLOCAMENTO MÁXIMOS DAS PROVAS DE CARGA

PROVA	ESTACA TIPO	CARGA MÁXIMA (kN)	DESLOCAMENTO MÁXIMO (mm)	DESLOCAMENTO PERMANENTE (mm)
1	FRANKI	52,5	12,51	7,78
2	FRANKI	52,5	10,05	3,41
3	FRANKI	97,5	11,01	4,03
4	FRANKI	97,5	14,92	5,06
5	FRANKI	97,5	3,58	1,44
6	ESCAVADO	97,5	5,96	2,91

3 - DETERMINAÇÃO DE y_0

Devido ao procedimento utilizado nos ensaios de Camaçari, foram medidos os deslocamentos y_t da cabeça da estaca que estava situada a cima da superfície do terreno (após a escavação).

Então, faz-se necessária a obtenção dos correspondentes deslocamentos y_0 à superfície (Figura 3), em cada estágio da prova.

Para isso, serão empregados dois métodos:

3.1 - Método A: Considera-se a hipótese de que a estaca estivesse engastada a uma profundidade L_f a partir da superfície do terreno (Figuras 4a e 4b). 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 entre a cabeça da estaca e a superfície do terreno

e, em seguida, o deslocamento y_0 à superfície do terreno:

$$y_0 = \frac{y_t}{2} \left[2 - \frac{3e}{e + L_f} + \left(\frac{e}{e + L_f} \right)^3 \right]$$

3.2 - Método B: Adaptando-se a proposição de KOCSIS (1971), pode-se decompor o deslocamento y_t da cabeça da estaca em três parcelas y_0 , y_1 e y_2 como mostram as Figuras 4a e 4c, sendo que:

$$y_1 = -S_0 e$$

$$y_2 = \frac{P_H e^3}{3 E I}$$

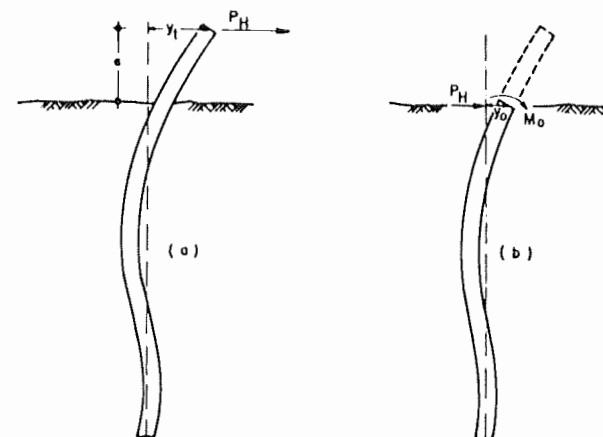


Figura 3 - DESLOCAMENTOS y_t E y_0 (ACIMA E À SUPERFÍCIE, RESPECTIVAMENTE)

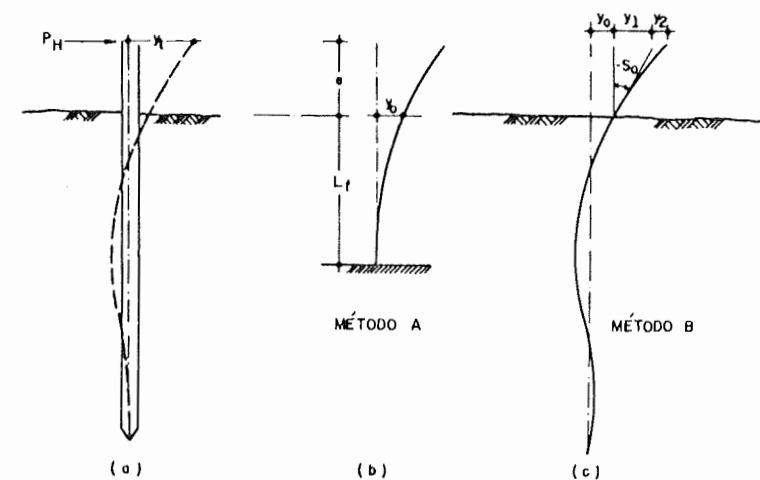


Figura 4 - DETERMINAÇÃO DO DESLOCAMENTO y_0 À SUPERFÍCIE

aproximadamente, onde S_0 é a rotação da estaca à superfície. Com a utilização das expressões e coeficientes adimensionais de MATLOCK e REESE (1961), tem-se que:

$$y_0 = 2,435 P_H \frac{T^3}{EI} + 1,623 (P_{He}) \frac{T^2}{EI}$$

$$y_1 = \left[1,623 P_H \frac{T^2}{EI} + 1,750 (P_{He}) \frac{T}{EI} \right] e$$

$$e \quad y_2 = \frac{P_H e^3}{3EI}$$

onde T é o fator de rigidez relativa estaca-solo.

Assim, por tentativas, procura-se o valor de T que satisfaça a igualdade $y_t = y_0 + y_1 + y_2$ e, para esse valor de T , obtêm-se o deslocamento y_0 à superfície.

Nas Tabelas 3 a 8, são apresentados os valores de y_0 , para cada estágio de carregamento, de todas as provas de carga, para os dois métodos empregados. Adotou-se o valor corrente de $E = 25.000 \text{ MN/m}^2$ para o módulo de elasticidade de estaca tipo Franki.

Com os valores obtidos para y_0 , pode-se construir um gráfico $P_H \times y_0$ para cada prova de carga, pelos métodos A e B. Assim, nas Figuras 5 e 6, são apresentados os gráficos das provas de carga $P_H \times y_t$ e os gráficos derivados $P_H \times y_0$, respectivamente.

4 - DETERMINAÇÃO DAS CURVAS $n_h \times y_0$

Obtidos os gráficos $P_H \times y_0$, passa-se a determinação da curva $n_h \times y_0$ para cada prova de carga. Isto também será feito de dois modos:

4.1 - Método A: Determinou-se a profundidade de engastamento L_f e o deslocamento horizontal y_0 da estaca à superfície, para cada estágio de carregamento da prova de carga. Mas, de acordo com MATLOCK e REESE (1961) tem-se que:

$$y_0 = 2,345 P_H \frac{T^3}{EI} + 1,623 (P_{He}) \frac{T^2}{EI}$$

Então, por tentativas, determina-se o valor adequado de T . Como

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

chega-se a

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

4.2 - Método B: Na obtenção de y_0 , já foi determinado o valor adequado de T . Basta fazer o cálculo final de:

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

Nas Tabelas 3 a 8, são apresentados os valores do parâmetro n_h em função de y_0 , para cada estágio de carregamento, de todas as provas de carga, para os dois métodos empregados.

Para o cálculo de y_0 , n_h e dos demais valores apresentados nas Tabelas 3 a 8, foram elaborados dois programas (métodos A e B) para a máquina calculadora HP-34C, de uma maneira tal que também pudessem ser utilizados na HP-67 com pequenas adaptações.

Finalmente, pode-se traçar a curva $n_h \times y_0$ para cada prova de carga; nas Figuras 7 e 8 são mostradas estas curvas, obtidas pelos Métodos A e B respectivamente. Não consta a curva referente à prova de carga nº 5 devido aos valores extremamente altos encontrados para n_h , conforme a Tabela 7.

A parte tracejada nestas figuras representa a extrapolação da prova até 95% da carga de ruptura, o que foi feito através do método de VAN DER VEEN (1953), para se uniformizar os ensaios.

5. DETERMINAÇÃO DO PARÂMETRO n_h

Analisando as curvas $n_h \times y_0$ das Figuras 7 e 8, observa-se a mesma constatação de ALIZADEH e DAVISSON (1970): para baixos valores de y_0 , o parâmetro n_h é exageradamente alto e muito dependente de y_0 ; enquanto que, para valores mais elevados de y_0 , n_h passa a ser quase independente de y_0 .

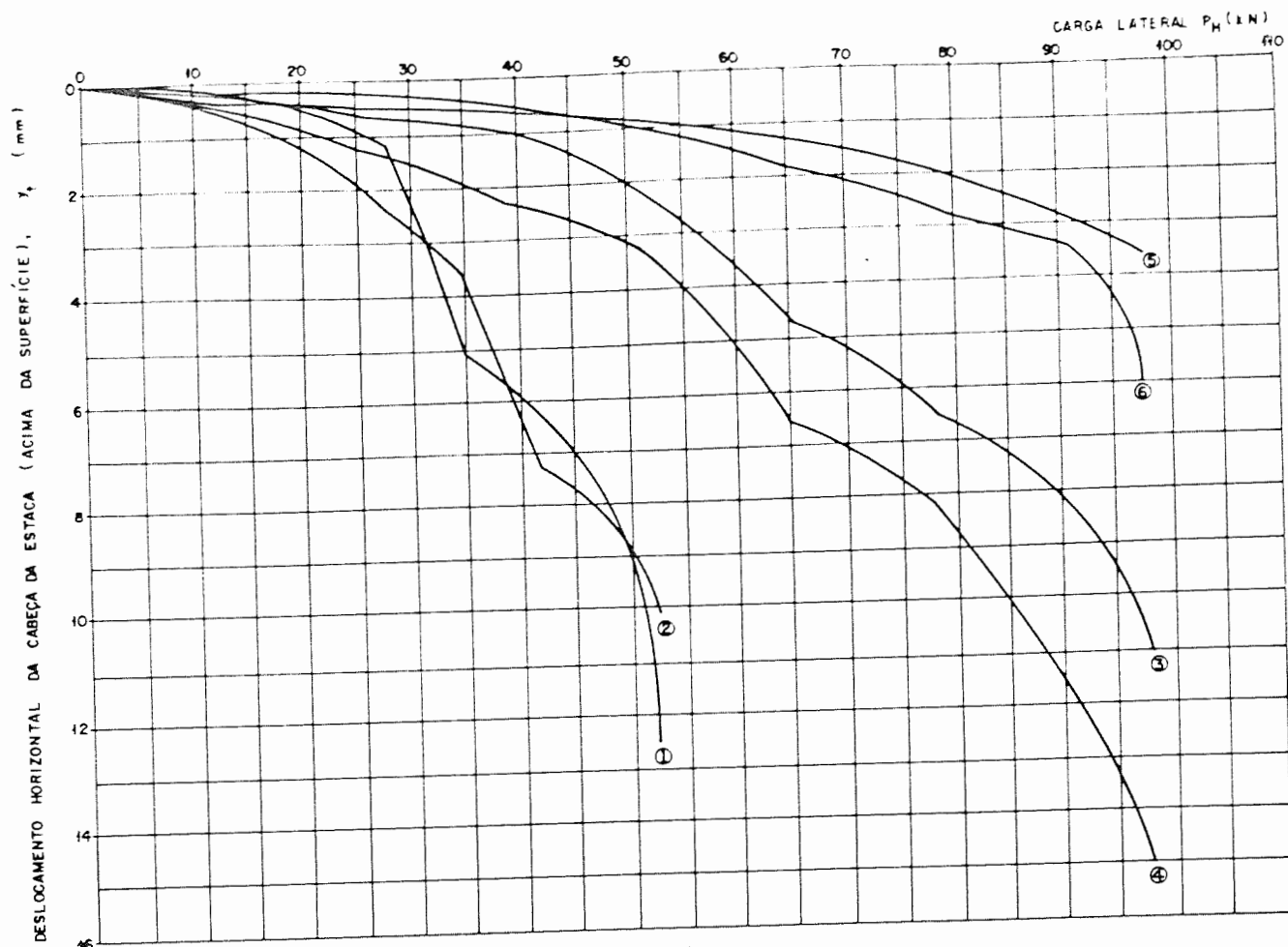


Figura 5 - PROVAS DE CARGA DE CAMAÇARI ($P_H \times y_t$)

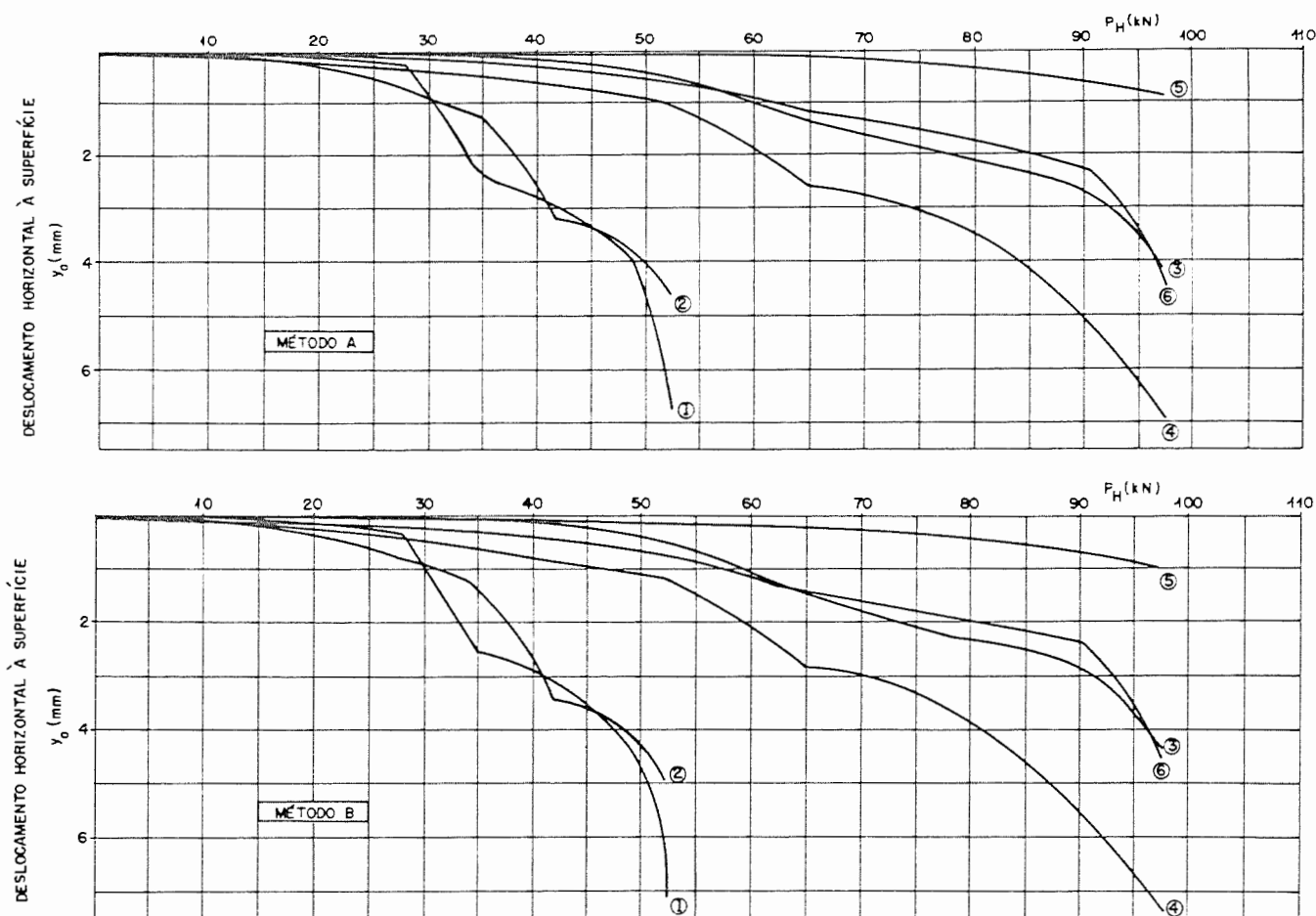


Figura 6 - GRÁFICOS DERIVADOS $P_H \times y_0$ DAS PROVAS DE CARGA

TABELA 3 - DESLOCAMENTO y_0 E COEFICIENTE DE REAÇÃO n_h (PROVA DE CARGA Nº 1)

P_H (kN)	y_t (mm)	MÉTODO A				MÉTODO B				
		L_f (m)	y_0 (mm)	T (m)	n_h (MN/m ³)	y_2 (mm)	T (m)	y_1 (mm)	y_0 (mm)	n_h (MN/m ³)
7,0	—									
14,0	0,24	0,27	0,02	0,15	435,945	0,11	0,15	0,11	0,02	359,223
21,0	0,60	0,49	0,10	0,27	23,758	0,16	0,27	0,33	0,11	20,562
28,0	1,13	0,66	0,26	0,36	5,535	0,22	0,36	0,63	0,28	4,853
35,0	5,14	1,50	2,39	0,79	99	0,27	0,81	2,35	2,52	89
42,0	6,34	1,52	2,97	0,81	93	0,32	0,82	2,88	3,13	83
49,0	8,25	1,61	4,01	0,85	70	0,38	0,87	3,65	4,22	63
52,5	12,51	1,92	6,73	1,01	30	0,41	1,03	5,04	7,06	27

TABELA 4 - DESLOCAMENTO y_0 E COEFICIENTE DE REAÇÃO n_h (PROVA DE CARGA Nº 2)

P_H (kN)	y_t (mm)	MÉTODO A				MÉTODO B				
		L_f (m)	y_0 (mm)	T (m)	n_h (MN/m ³)	y_2 (mm)	T (m)	y_1 (mm)	y_0 (mm)	n_h (MN/m ³)
7,0	0,30	0,59	0,05	0,32	9,317	0,07	0,33	0,17	0,06	8,259
14,0	0,66	0,64	0,13	0,35	6,186	0,15	0,36	0,37	0,14	5,475
21,0	1,20	0,75	0,28	0,40	2,908	0,22	0,42	0,67	0,30	2,533
28,0	2,39	1,00	0,75	0,54	709	0,30	0,55	1,29	0,80	625
35,0	3,53	1,12	1,22	0,60	419	0,37	0,61	1,87	1,29	369
42,0	7,28	1,54	3,20	0,81	88	0,45	0,83	3,45	3,38	79
49,0	8,44	1,53	3,70	0,81	89	0,52	0,83	4,01	3,91	60
52,5	10,05	1,62	4,58	0,86	67	0,56	0,88	4,65	4,84	60

TABELA 5 - DESLOCAMENTO y_0 E COEFICIENTE DE REAÇÃO n_h (PROVA DE CARGA Nº 3)

P_H (kN)	y_t (mm)	MÉTODO A				MÉTODO B				
		L_f (m)	y_0 (mm)	T (m)	n_h (MN/m ³)	y_2 (mm)	T (m)	y_1 (mm)	y_0 (mm)	n_h (MN/m ³)
13,0	0,20	0,21	0,00	0,11	5,732,353	0,13	0,12	0,06	0,01	4,341,747
26,0	0,60	0,44	0,05	0,24	116,808	0,27	0,25	0,28	0,05	99,093
39,0	0,95	0,47	0,08	0,26	78,778	0,40	0,26	0,46	0,09	69,474
52,0	2,25	0,87	0,43	0,47	4,032	0,53	0,48	1,26	0,46	3,499
65,0	4,70	1,29	1,36	0,69	574	0,66	0,71	2,58	1,45	504
78,0	6,50	1,42	2,06	0,76	358	0,80	0,78	3,51	2,19	315
91,0	8,30	1,51	2,77	0,80	268	0,93	0,82	4,43	2,94	237
97,5	11,01	1,72	4,10	0,92	140	0,99	0,94	5,66	4,35	124

TABELA 6 - DESLOCAMENTO y_0 E COEFICIENTE DE REAÇÃO n_h (PROVA DE CARGA Nº 4)

P_H (kN)	y_t (mm)	MÉTODO A				MÉTODO B				
		L_f (m)	y_0 (mm)	T (m)	n_h (MN/m ³)	y_2 (mm)	T (m)	y_1 (mm)	y_0 (mm)	n_h (MN/m ³)
13,0	0,50	0,88	0,11	0,47	3,835	0,11	0,49	0,28	0,11	3,301
26,0	1,30	1,08	0,34	0,58	1,389	0,21	0,59	0,72	0,36	1,216
39,0	2,30	1,21	0,67	0,65	783	0,32	0,67	1,26	0,72	785
52,0	3,30	1,28	1,01	0,68	611	0,42	0,70	1,80	1,08	537
65,0	6,60	1,71	2,59	0,91	144	0,53	0,93	3,32	2,75	128
78,0	8,20	1,75	3,27	0,93	130	0,64	0,95	4,10	3,47	116
91,0	12,00	1,99	5,25	1,05	69	0,74	1,06	5,70	5,55	62
97,5	14,92	2,15	6,89	1,14	47	0,80	1,16	6,85	7,28	42

TABELA 7 — DESLOCAMENTO y_0 E COEFICIENTE DE REAÇÃO n_h (PROVA DE CARGA N° 5)

P _H (kN)	y _t (mm)	MÉTODO A				MÉTODO B				
		L _f (m)	y ₀ (mm)	T (m)	n _h (MN / m ³)	y ₂ (mm)	T (m)	y ₁ (mm)	y ₀ (mm)	n _h (MN/m ³)
13.0	0.35	0.74	0.07	0.39	9.480	0.08	0.41	0.20	0.07	7.985
26.0	0.50	0.53	0.06	0.29	45.681	0.17	0.30	0.27	0.07	39.322
39.0	0.60	0.41	0.05	0.22	166.871	0.25	0.23	0.29	0.06	147.237
52.0	0.90	0.47	0.10	0.26	81.209	0.33	0.26	0.46	0.10	71.140
65.0	1.29	0.55	0.17	0.30	38.909	0.42	0.31	0.69	0.18	33.650
78.0	1.90	0.67	0.32	0.36	14.335	0.50	0.37	1.05	0.35	12.407
91.0	2.88	0.84	0.63	0.45	4.717	0.58	0.47	1.62	0.68	4.100
97.5	3.58	0.95	0.89	0.51	2.667	0.63	0.52	2.00	0.95	2.325

TABELA 8 — DESLOCAMENTO y_0 E COEFICIENTE DE REAÇÃO n_h (PROVA DE CARGA N° 6)

P_H (kN)	y_t (mm)	MÉTODO A			MÉTODO B					
		L_f (m)	y_0 (mm)	T (m)	n_h (MN/m ³)	y_2 (mm)	T (m)	y_1 (mm)	y_0 (mm)	n_h (MN/m ³)
13.0	0.15	1.47	0.08	0.78	1.054	0.04	0.79	0.06	0.08	963
26.0	0.20	1.19	0.09	0.63	2.940	0.04	0.64	0.09	0.10	2.665
39.0	0.50	1.55	0.27	0.81	824	0.02	0.83	0.20	0.29	749
52.0	1.00	1.87	0.60	0.98	321	0.02	1.00	0.35	0.63	296
65.0	1.85	2.23	1.20	1.17	135	0.03	1.19	0.58	1.25	126
78.0	2.65	2.41	1.77	1.26	82	0.03	1.28	0.78	1.84	86
91.0	3.50	2.54	2.38	1.33	71	0.04	1.35	0.99	2.47	67
97.5	5.96	3.08	4.32	1.61	27	0.04	1.63	1.46	4.47	26

por isso, é prudente ignorar os valores extremamente altos de n_h para pequenos deslocamentos. Quanto ao nível característico de y_0 , pode-se estabelecer, com base na análise das Figuras 7 e 8, o intervalo compreendido entre 4 e 8mm, no qual a variação de n_h com y_0 é relativamente pequena.

Neste intervalo o parâmetro n_h varia de 25 a 145 MN/m³, podendo-se portanto, adotar o valor médio de 85 MN/m³. O valor de n_h assim determinado, propicia uma concordância muito boa entre os deslocamentos y_0 derivados de provas de carga e os previstos pelos vários métodos da teoria de reação horizontal do solo, CINTRA (1981).

6 - CONCLUSOES

1ª - É possível generalizar a recomendação de ALIZADEH e DAVISSON (1970), ao considerar também o efeito da aplicação de momento fletor. Nas provas de carga de Camaçari, analisadas neste trabalho, também se constatarem valores elevados do parâmetro n_h para pequenos deslocamentos y_0 , podendo-se determinar o intervalo característico para y_0 de 4 a 8mm, sendo estes limites inferiores ao de ALIZADEH e DAVISSON (6,35 e 12,70mm) provavelmente pela escavação do solo fofo superficial. Deve-se lembrar que justamente a camada superficial exerce uma grande influência no comportamento da estaca carregada lateralmente.

2ª - O valor de n_h determinado neste trabalho, $n_h = 85$ MN/m³, é superior aqueles recomendados por TERZAGHI (1955): 2,5 a 18,0 MN/m³, e por outros autores. Entretanto, parece ser compatível com o valor experimental determinado por ALIZADEH e DAVISSON (1970), $n_h = 28$ MN/m³, para a condição do nível d'água praticamente na superfície e sem a remoção do solo superficial. Portanto, os valores recomendados pelos diversos autores seriam conservativos.

3ª - Na determinação do deslocamento y_0 à superfície, a partir do valor de y_t (acima da superfície) foram utilizados dois métodos que apresentaram uma concordância muito boa. Portanto, ambos os métodos seriam eficazes para determinação de y_0 , conhecido y_t da prova de carga.

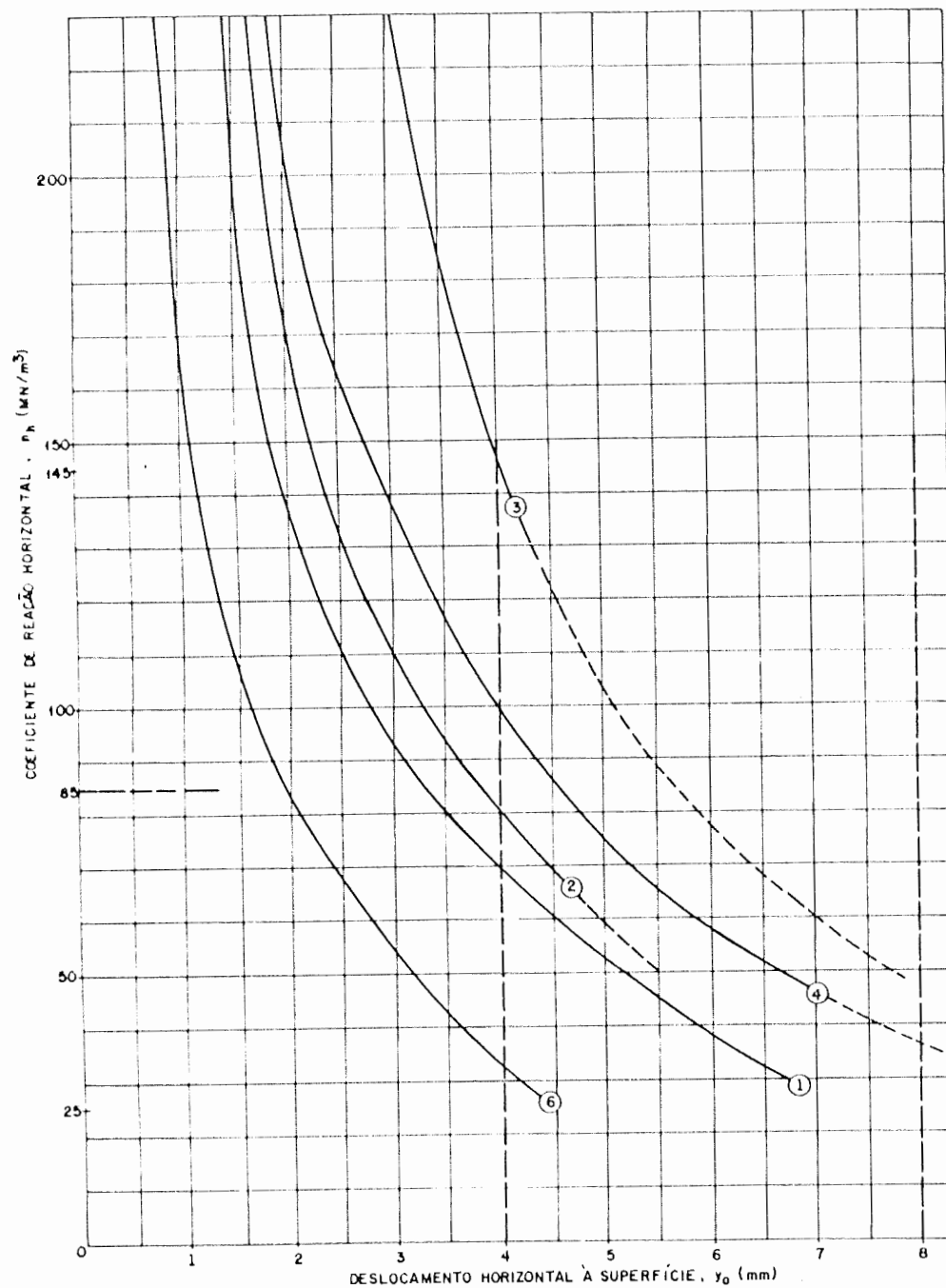


Figura 7 — CURVAS $n_h \times y_0$ (MÉTODO A)

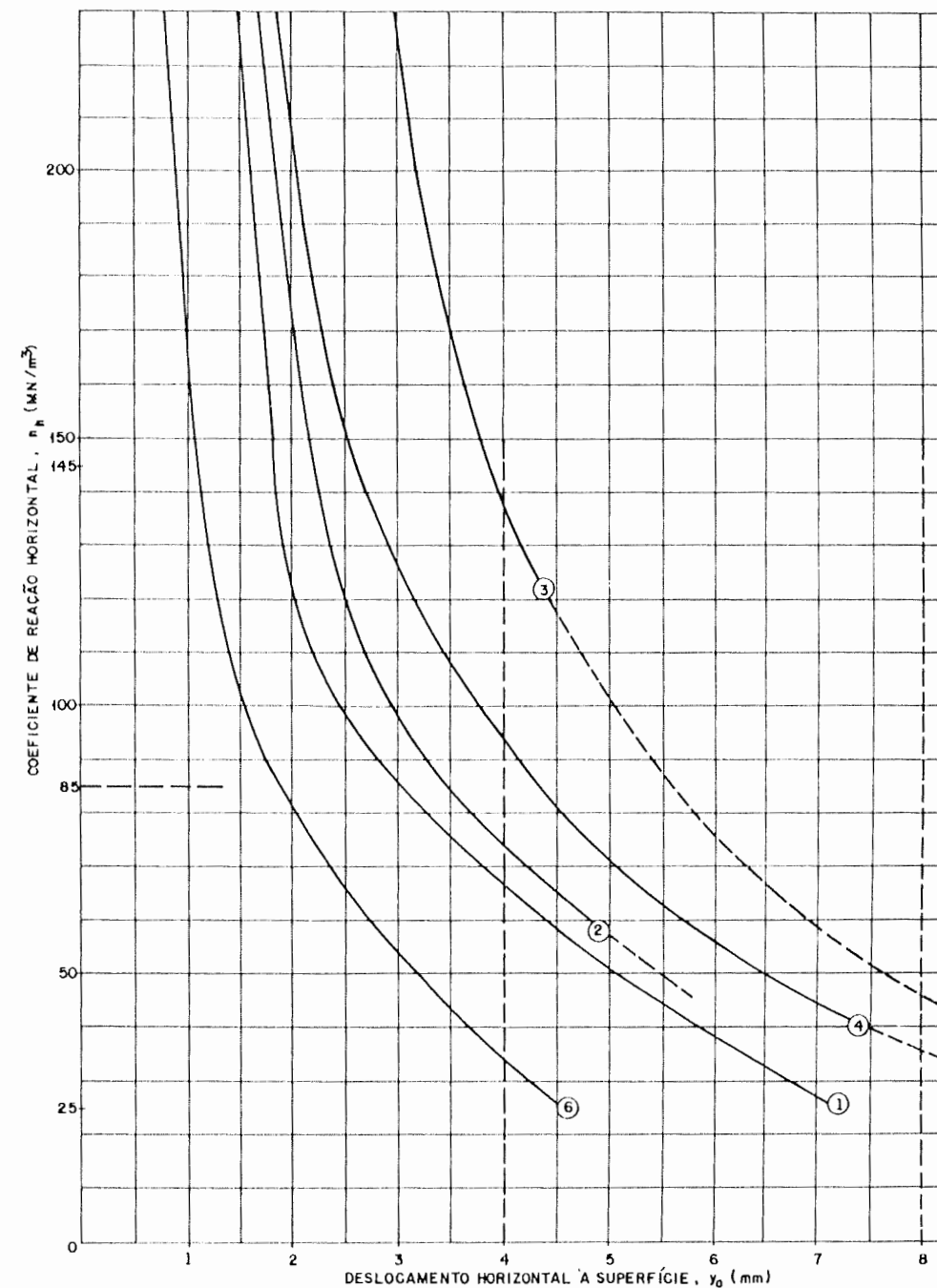


Figura 8 — CURVAS $n_h \times y_0$ (MÉTODO B)

7 - AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Ernesto C. Drehmer, diretor da CARAÍBA METAIS-S/A. - Ind. e Com. e ao Engº Paulo Cesar Brechbuhler da GEOTÉCNICA S/A., os nossos agradecimentos por autorizarem a análise das provas de carga ensaiadas na obra da Metalurgia e Ácido Sulfúrico em Camaçari-BA pela TECNOSOLO - Engenharia e Tecnologia de Solos e Materiais S/A.

8 - BIBLIOGRAFIA

- ALIZADEH, M. e DAVISSON, M.T. (1970) - "Lateral Load Tests on Piles - Arkansas River Project", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 96, nº SM5, pp. 1583-1604.
- CINTRA, J.C.A. (1981) - "Uma Análise de Provas de Carga Lateral em Estacas e 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.
- KOCSIS, P. (1971) - Discussion of "Lateral Load Tests on Piles - Arkansas River Project", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 97, nº SM6, JUN, pp.932-935.
- 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/1PT, São Paulo, Notas de Aula.
- FERZAGHI, K. (1955) - "Evaluation of Coefficients of Subgrade Reaction", Géotechnique, The Institution of Civil Engineers, Vol. 5, nº 4, DEZ, pp. 297-326.
- VAN DER VEEN, C. (1953) - "The Bearing Capacity of a Pile", Proc. Third Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Zurich, Vol.2, pp. 84-90.