

MÉTODO DAS DUAS RETAS MODIFICADO APLICADO A ESTACAS COM BULBOS

MARQUES, J.A.F.¹ MASSAD, F.²

Resumo: Apresenta-se neste trabalho o “Método das Duas Retas Modificado” (MDRM) para a interpretação da curva carga-recalque no topo, de estacas rígidas com bulbos. Trata-se do “Método das Duas Retas”, desenvolvido anteriormente, modificado com base nos resultados da instrumentação em profundidade de 5 estacas-teste, executadas em Maceió-Al. É feita uma breve apresentação desses dados, com ênfase nas Relações de Cambefort e nas correlações entre parâmetros de Cambefort e o SPT, visando aplicações práticas. O MDRM foi aplicado, inicialmente, às 5 estacas-teste, mostrando a sua eficácia, e, posteriormente, a 21 outras estacas, executadas em várias cidades nordestinas e submetidas apenas a provas de carga comuns. São feitas comparações: a) entre parâmetros de Cambefort, convenientemente agrupados, determinados, quer através do MDRM quer de correlações com o SPT; e b) entre cargas de trabalho, estimadas quer pelo MDRM e quer diretamente pelas provas de carga.

Palavras-Chave: Estacas com bulbos, provas de carga, modelo matemático.

INTRODUÇÃO

As estacas escavadas de pequeno diâmetro, com bulbos, são usualmente empregadas nas fundações de obras prediais usuais, em várias cidades do nordeste brasileiro. Foi desenvolvida na cidade de Maceió-Al, em função da necessidade que se tinha de atravessar uma camada de areia superficial, medianamente compacta a compacta (SPT superior a 20 golpes, a 2 ou 3m de profundidade), com espessura média estimada em 4 a 5m. No início, em 1986, essas estacas tinham diâmetro máximo de 30cm e carga de trabalho média de 350kN. Com o tempo passou-se a executar estacas com diâmetros maiores e bulbos ao longo do fuste. Com isto obteve-se consideráveis ganhos de capacidade de carga dessas estacas. Atualmente, projetam-se estacas com bulbos para cargas de trabalho de até 900kN, diâmetro de 45cm (MARQUES, 1997).

Para estudar o processo de transferência de carga, desse tipo de estaca, foi desenvolvida uma pesquisa por MARQUES (2004) envolvendo 5 estacas-teste instrumentadas em profundidade, submetidas a provas de carga de compressão axial, lentas e rápidas, cujos resultados são apresentados de forma breve. Com base nas funções de transferência de carga foi desenvolvido o “Método das Duas Retas Modificado” (MDRM) para a interpretação das curvas carga-recalque do topo de estacas curtas com bulbos, que se constitui no objeto central desse trabalho.

CARACTERÍSTICAS DOS LOCAIS DAS PROVAS DE CARGA

As provas de carga analisadas foram executadas em regiões sedimentares do Quaternário, compostas por solos arenosos, argilosos ou siltosos, com ou sem matéria orgânica. O lençol freático sempre ocorre próximo à superfície (0,5 m a 3,0 m).

Pode-se afirmar que os perfis geotécnicos das áreas em que foram realizados os ensaios, nas cidades de João Pessoa, Recife e Aracaju, são semelhantes. Em geral são constituídos por camadas superficiais de solos arenosos, com predominância de areias puras, espessuras variáveis entre 2 e 6m, de compactidade crescente de fofa a compacta, seguidas 2 a 6 m de silte argiloso ou argilas que podem ser orgânicas, com ou sem silte, de consistência mole a muito mole. Por último, ocorrem areias medianamente compactas a compactas, ou argilas arenosas rijas.

Na região praieira de Maceió (Figura 1), onde foram executadas as estacas-teste e grande parte das estacas analisadas, o perfil do subsolo inicia-se com uma camada predominantemente arenosa, de espessura média de 5m e compactidade variável entre fofa a muito compacta. Abaixo desta, ocorrem areias siltosas ou siltes arenosos (às vezes argilosos), de compactidade fofa, e, na seqüência, areias compactas ou, eventualmente, calcário arenítico.

BREVE APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DA PESQUISA

¹ Juliane A.F. Marques, D.Sc. pela EPUSP; responsável técnica da AGM Geotecnia Ltda. juliandr@usp.br

² Faical Massad, D.Sc., Professor Titular da EPUSP. faical.massad@poli.usp.br

Na pesquisa desenvolvida por MARQUES (2004) foram analisadas 5 estacas-teste, instrumentadas em profundidade com “strain-gages” e submetidas a provas de carga à compressão, dos tipos lenta e rápida, segundo as recomendações da NBR-12131/91 MB-3472.

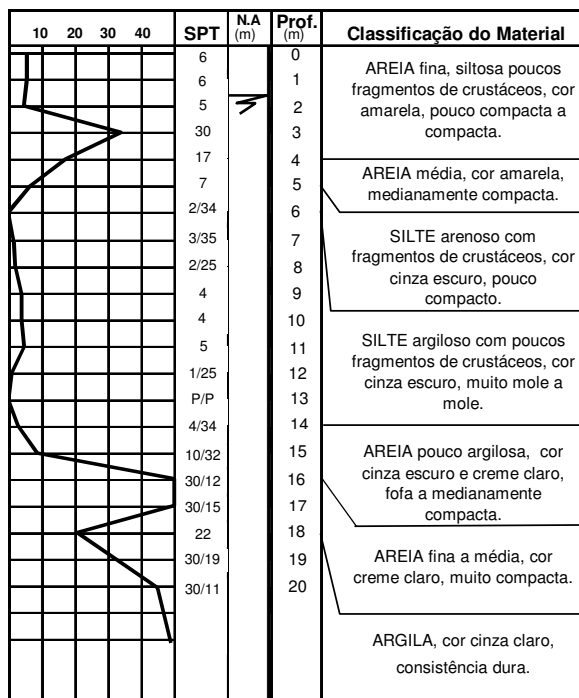


Figura 1. Perfil do subsolo fornecido pela sondagem SP-01 – Maceió.

As estacas-teste tinham diâmetro nominal de 30cm, comprimento de 9m e foram armadas ao longo de todo o comprimento. Foram executadas duas estacas com dois bulbos, uma estaca com bulbo superior, uma estaca com bulbo inferior e uma estaca sem bulbo. Nesta última ocorreu a formação de um bulbo na ponta face à existência de solo de mais baixa resistência.

Após a realização das provas de carga, as 5 estacas-teste foram extraídas do terreno, numa das etapas mais difíceis dos trabalhos de campo. Com a extração verificou-se a variabilidade dos formatos dos bulbos e fustes em função da consistência ou compacidade dos solos atravessados. A análise conjunta da geometria real das estacas e dos dados da instrumentação, em profundidade, foi decisiva para a interpretação e compreensão do processo de transferência de carga das estacas ao solo. A seguir serão apresentados os diagramas e as funções de transferência de carga da estaca com dois bulbos E2B2, com o objetivo de ilustrar as análises feitas com as cinco estacas-teste.

Diagramas e funções de transferência de carga da estaca E2B2

A Figura 2 mostra os gráficos de transferência de carga em profundidade da estaca E2B2, nos ensaios lento e rápido, em que se pode verificar a grande contribuição do bulbo, entre 2 e 3,2m, e da ponta. Na ruptura, ensaio lento, o bulbo absorveu 45% da carga de ruptura e a ponta 23%, enquanto que, no ensaio rápido, o bulbo absorveu 41% da carga de ruptura e a ponta 28%. Nos dois ensaios, a resistência de apoio (bulbo+ponta) absorveu em torno de 69% da carga de ruptura.

Na Figura 3-a tem-se os gráficos das reações do bulbo (q_b) e da ponta (q_p) em função do deslocamento acumulado do bulbo e da ponta. O limite da reação de ponta de 493kPa foi atingido para um deslocamento de 55mm no ensaio lento. Houve uma redução do deslocamento para 20mm no ensaio rápido ao se atingir a reação máxima de ponta de 683kPa. Verifica-se um aumento de carga de ponta do primeiro para o segundo carregamento (65kN), o qual é ocasionado pelo aumento da velocidade de carregamento. De forma análoga, foi analisada a reação do bulbo superior (q_b) onde se constatou que no primeiro carregamento atingiu-se o limite de reação de bulbo de 3363kPa para um deslocamento de 53mm. O limite da reação de bulbo no ensaio rápido foi de 3518kPa para um deslocamento não acumulado de 17mm. A análise do atrito lateral unitário, por trecho instrumentado da estaca E2B2, pode ser feita através da Figura 3-b. No trecho 0,5-2,2m o atrito lateral unitário máximo permaneceu em torno de 73kPa, nos ensaios lento e rápido. O trecho 3,2-4,4m apresenta valores de atrito de 50kPa, no ensaio lento, e 72kPa, no ensaio rápido. Neste trecho, os valores

elevados de atrito lateral podem ser explicados pelo formato do fuste da estaca: na profundidade de 3,2m o diâmetro do fuste era de 30,6 cm e, na de 4,4m, de 29,0 cm. Essa diminuição de diâmetro caracteriza o

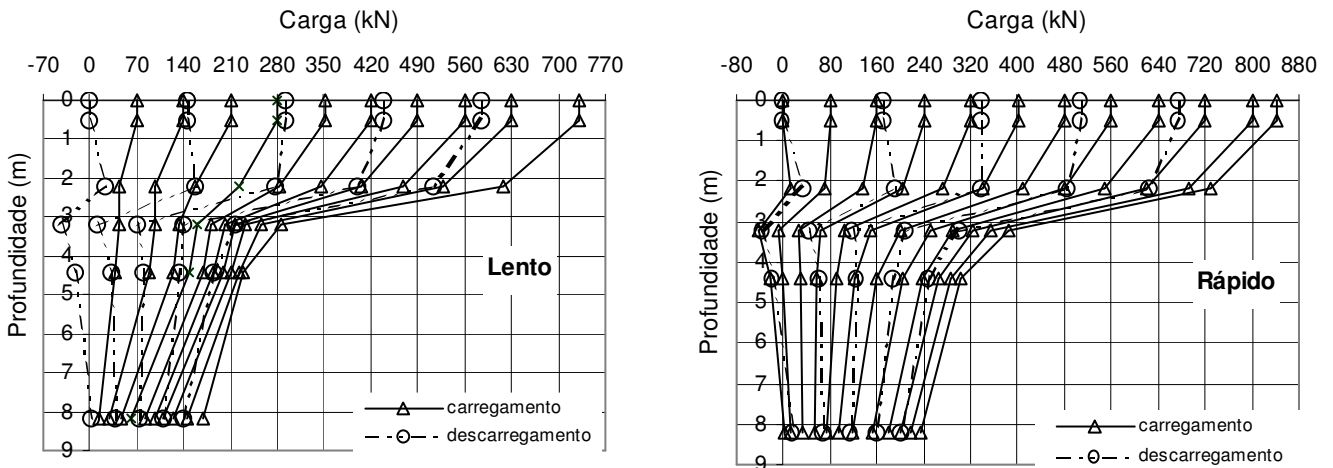


Figura 2. Gráficos de Transferência de Carga da estaca E2B2, ensaios lento e rápido.

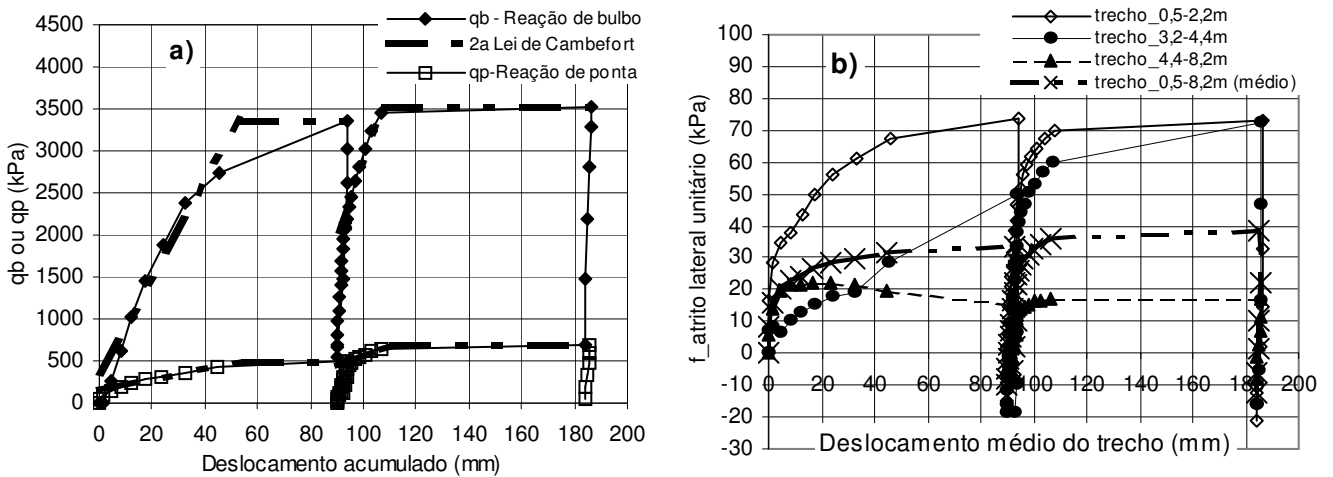


Figura 3. Funções de Transferência de Carga da estaca E2B2: a) ponta e bulbo, e b) atrito lateral unitário.

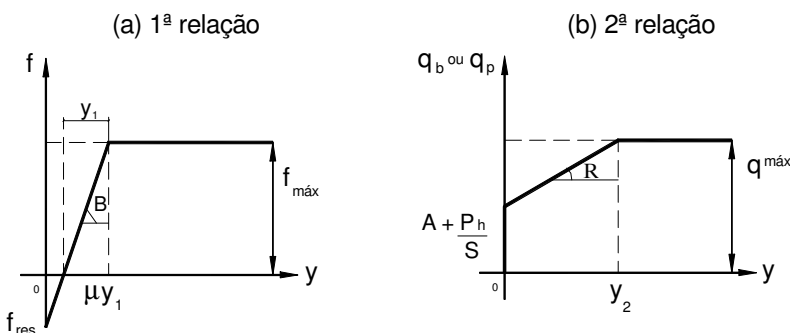


Figura 4. Relações de Cambefort Modificadas.

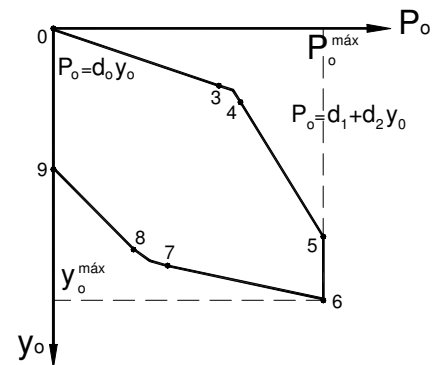


Figura 5. Curva carga-recalque no topo, para estacas com bulbo, rígidas.

formato cônico do trecho, o qual favorece o aumento do atrito lateral. Verifica-se que o último trecho instrumentado (4,4-8,2m) apresentou queda do atrito lateral unitário devido ao formato cônico invertido do trecho, ou seja, o diâmetro do fuste aumenta com a profundidade devido à baixa resistência do solo próximo

à ponta da estaca. A estaca, com formato cônico invertido, quando submetida a grandes deslocamentos, apresenta queda total ou parcial do atrito lateral pois ocorre descolamento fuste-solo. O atrito unitário médio ao longo de todo fuste, trecho 0,5-8,2m na Figura 3-b, atingiu valores máximos de 34kPa e 38kPa, para deslocamentos da ordem de 3mm e 6mm, nos ensaios lento e rápido, respectivamente.

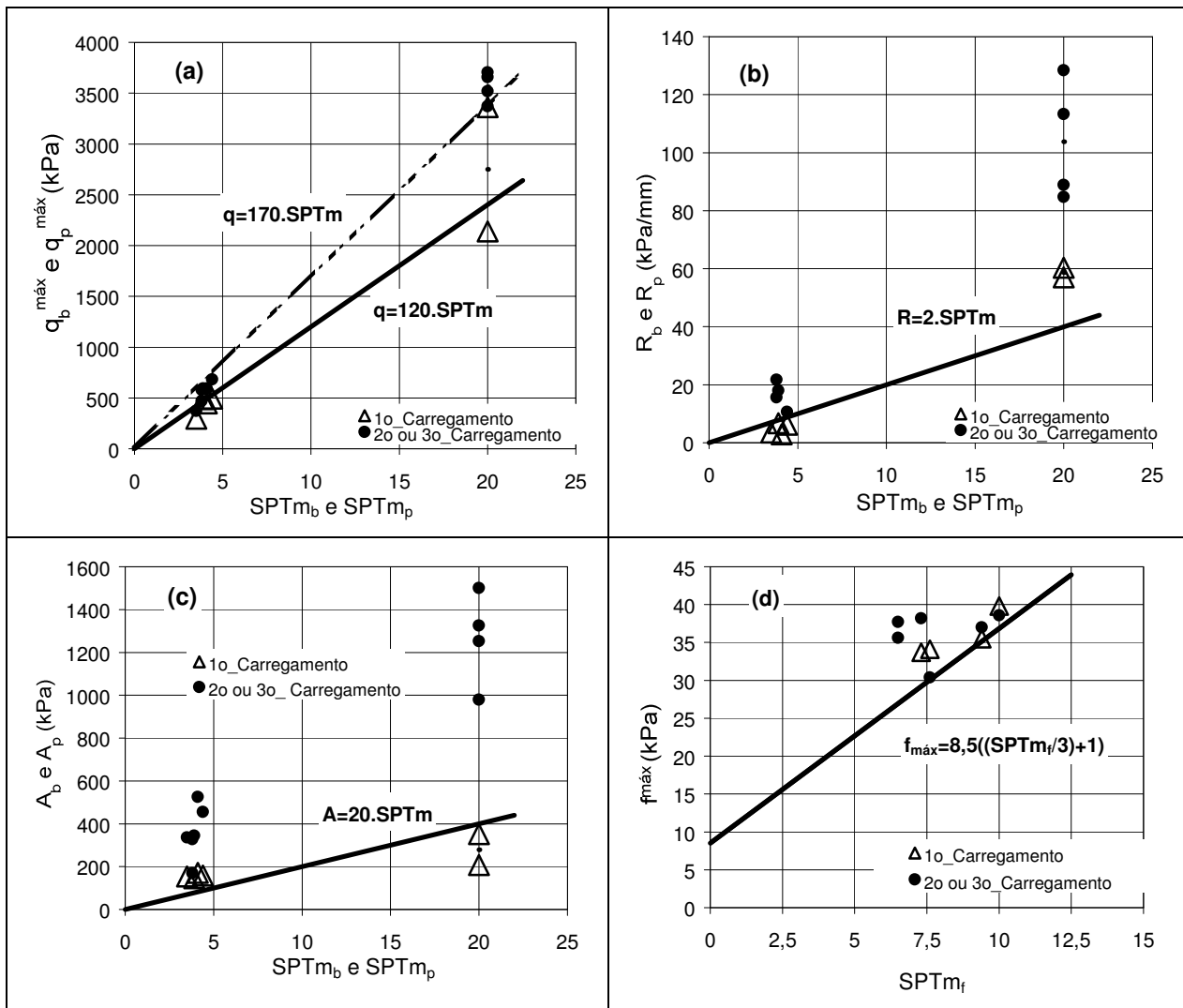


Figura 6. Parâmetros de Cambefort em função do SPT.

Parâmetros de Cambefort em função o SPT

Para todas as estacas-teste, carregamentos lentos e rápidos, foram determinados os parâmetros de Cambefort, como está ilustrado na Figura 3. Esses parâmetros, a saber, R_b , R_p , A_b , A_p , q_b e q_p , estão definidos através da Figura 4. Note-se que no bulbo superior e na ponta existem parcelas de reação inicial não nulas para deslocamentos nulos, isto é, os termos $A_b > 0$ e $A_p > 0$.

A Figura 6 mostra como esses parâmetros variam em função dos valores médios do SPT do bulbo ($SPTm_b$), da ponta ($SPTm_p$) e do fuste ($SPTm_f$). Vê-se que existem 2 universos distintos, referentes ao 1º carregamento e aos 2º e 3º carregamentos. Vale lembrar que apenas numa das estacas-teste foram aplicados 3 carregamentos, na seguinte ordem: 1º carregamento lento (interrompido); 2º carregamento lento; e 3º carregamento rápido. Nas correlações com o SPT trabalhou-se com retas partindo da origem e ajustadas pelo limite inferior dos pontos (com exceção do atrito lateral unitário), que em geral estão associados ao primeiro carregamento, que representa a condição de uso das estacas em obras prediais usuais.

As retas limites inferiores para os primeiros carregamentos são as seguintes:

$$q_b^{max} = 120 \cdot SPTm_b \quad \text{e} \quad q_p^{max} = 120 \cdot SPTm_p \quad (1)$$

$$R_b = 2 \cdot SPTm_b \quad \text{e} \quad R_p = 2 \cdot SPTm_p \quad (2)$$

$$A_b = 20 \cdot SPTm_b \quad \text{e} \quad A_p = 20 \cdot SPTm_p \quad (3)$$

Para as reações dos bulbos superiores, que se apóiam em areia siltosa ($SPT \cong 20$), pode-se pensar em adotar a reta tracejada da Figura 6-a, dada:

$$q_b^{max} = 170 \cdot SPTm_b \quad (4)$$

o que não foi feito no presente trabalho, mantendo-se um enfoque mais conservador. Observa-se na Figura 6-d, que os valores de $f_{máx}$ variaram de 30kPa a 40kPa, para os SPTs médios de 6,5 a 10. A reta limite inferior aos pontos é dada pela equação de DÉCOURT (1996) para o atrito lateral na ruptura:

$$f_{máx} = 10\beta \left(\frac{SPTm_f}{3} + 1 \right), \text{ com } \beta=0,85 \quad (5)$$

MÉTODO DAS DUAS RETAS MODIFICADO (MDRM)

O modelo matemático aqui proposto para a interpretação da curva carga-recalque de estacas escavadas de pequeno diâmetro, com bulbos, foi denominado “Método das Duas Retas Modificado” (MDRM), o qual tem como base os trabalhos de MASSAD (1992), LAZO (1996) e MASSAD & LAZO (1998). Esses autores desenvolveram o método “Método das Duas Retas” que adota como funções de transferência de carga as Leis ou Relações de Cambefort, e analisaram o comportamento de estacas rígidas ou curtas, cuja compressibilidade influi pouco no formato da curva carga-recalque do topo.

No novo procedimento proposto foram incluídas modificações no método original, decorrentes das análises da instrumentação em profundidade das 5 estacas-teste. Um dos resultados da instrumentação das estacas-teste refere-se à 2ª Relação de Cambefort, que apresentou uma reação de apoio (bulbo+ponta) inicial não nula ($A \neq 0$, ver Figura 4). Já a 1ª Relação de Cambefort mostrou que a “adesão” do solo, referente ao atrito lateral unitário (f) para um deslocamento nulo (y), é nula. Outra hipótese simplificadora foi considerar o solo homogêneo em toda a profundidade, isto é, trabalhou-se com valores médios de atrito lateral (f) ao longo do fuste.

Para as estacas com bulbos, a curva carga (P_0)-recalque (y_0) no topo tem o formato mostrado na Figura 5, isto é, é composta por duas retas, uma delas correspondente ao trecho pseudo-elástico (0-3) e, a outra, ao trecho de desenvolvimento franco da reação (ponta e bulbo) de apoio (4-5). Considerou-se que o trecho 3-4, referente ao desenvolvimento progressivo do atrito do topo à base da estaca, inexistente. Dessa forma os pontos P_{03} e P_{04} da curva carga-recalque no topo coincidem. Segundo MASSAD (1992), para estacas curtas ou rígidas, as equações que definem essas duas retas são as seguintes:

- a) para o trecho 0-3, pseudo-elástico,

$$P_0 = \mu \cdot Alr \cdot \frac{\beta'_3}{z} \cdot \frac{y_0}{\mu \cdot y_1} \quad (6)$$

onde:

$$\beta' = \frac{\tanh(z) + \lambda}{1 + \lambda \cdot \tanh(z)} \quad (7)$$

$$z = \sqrt{k} \quad (8)$$

k será definido adiante, pela expressão (23).

- b) para o trecho 4-5, de desenvolvimento franco da resistência de ponta,

$$\frac{P_0 - \mu \cdot Alr}{y_0 - \frac{\mu \cdot Alr}{2 \cdot K_r}} = \frac{1}{\frac{1}{RS} + \frac{1}{K_r}} \quad (9)$$

Nestas expressões Alr é o atrito lateral total na ruptura; $K_r = ES/h$ é a rigidez da estaca, considerada como peça estrutural, sendo E o módulo de elasticidade da estaca, h o seu comprimento e S a área da sua seção transversal.; e μ é o fator de majoração (MASSAD, 1992) do atrito lateral pela carga residual (P_h) presa na ponta da estaca, dado por:

$$\mu = 1 + \frac{P_h}{Alr} \quad (10)$$

Como as estacas em pauta são rígidas, pode-se admitir que a mobilização das reações $A_b S_b$ e $A_p S_p$ ocorrem concomitantemente à mobilização da carga residual P_h . Assim pode-se substituir $\mu Alr = Alr + P_h$ por $\mu Alr + AS$, onde:

$$AS = A_b S_b + A_p S_p \quad (11)$$

Pelo mesmo motivo (estacas rígidas), a mobilização das reações do bulbo e da ponta, no trecho pseudo-elástico, se dá concomitantemente, o que autoriza substituir RS da expressão (9) por:

$$RS = R_b S_b + R_p S_p \quad (12)$$

Assim, as expressões (6) e (9) podem ser reescritas:

$$P_0 = (\mu Alr + AS) \cdot \frac{\beta'_3 y_0}{z y_1} \quad (13)$$

$$\frac{P_0 - (\mu Alr + AS)}{y_0 - \frac{\mu Alr + AS}{2K_r}} = \frac{1}{\frac{1}{RS} + \frac{1}{K_r}} \quad (14)$$

Nota-se que as expressões (13) e (14) são as equações das duas retas, trechos (0-3) e (4-5) da Figura 5. Se a equação do trecho 4-5 da curva carga-recalque de estacas rígidas com bulbos puder ser representada por:

$$P_o = d_1 + d_2 \cdot y_o \quad (15)$$

pode-se concluir que:

$$\frac{1}{d_2} = \frac{1}{RS} + \frac{1}{K_r} \quad (16)$$

$$\mu \cdot Alr + AS = \frac{d_1}{1 - \frac{d_2}{2K_r}} \quad (17)$$

As equações (16) e (17) constituem a base do denominado “Método das Duas Retas Modificado” (MDRM), aplicável a estacas rígidas, com bulbos.

Do mesmo modo, se for possível ajustar os pontos da curva $P_o - y_o$ referentes ao trecho 0-3, por:

$$P_0 = d_0 y_0 \quad (18)$$

pode-se determinar y_1 facilmente. De fato, lembrando-se que o ponto 4 corresponde ao início do esgotamento do atrito no topo da estaca e está associado a $y_{04} \cong y_{03} = \mu y_1$ (ver a Figura 5) e que, ademais, o bulbo e a ponta deslocam igualmente de μy_1 , pois a estaca é rígida, pode-se escrever:

$$P_{03} \cong P_{04} = (\mu \cdot Alr + AS) + RS \cdot \mu \cdot y_1 \quad (19)$$

Mas, pela expressão (18):

$$P_{03} = d_{03} y_{03} = d_0 \cdot \mu \cdot y_1 \quad (20)$$

Substituindo esta expressão em (19) vem:

$$d_0 \cdot \mu \cdot y_1 = (\mu \cdot Alr + AS) + RS \cdot \mu \cdot y_1 \quad (21)$$

donde:

$$\mu \cdot y_1 = \frac{(\mu \cdot Alr + AS)}{d_0 - RS} \quad (22)$$

que permite uma estimativa de y_1 , deslocamento necessário para esgotar o atrito lateral unitário (Figura 4-a).

Para os primeiros carregamentos em estacas escavadas tem-se $\mu=1$, isto é, não há cargas residuais presas nas pontas e nos bulbos.

APLICAÇÃO DO MDRM ÀS PROVAS DE CARGA INSTRUMENTADAS E COMUNS

Provas de carga instrumentadas: Estacas-teste

O Método das Duas Retas Modificado foi aplicado inicialmente às cinco estacas-teste, pois, como mostra a Tabela 1, o valor de k variou entre 0,1 e 0,5, confirmando que todas elas eram muito rígidas. O parâmetro k , coeficiente de rigidez relativa solo (fuste)-estaca, foi definido por MASSAD (1992) como sendo:

$$k = \frac{\mu \cdot A_{lr}}{K_r \cdot y_1} \quad (23)$$

Como MASSAD (1992) mostrou, para uma estaca ser rígida basta que $k < 2$.

A Figura 7 mostra a aplicação do MDRM à curva carga-recalque no topo da estaca-teste E2B2. Também estão indicadas as retas dos trechos (0-3) e (4-5) dadas pelas expressões (18) e (15), respectivamente.

Tabela 1. Valores de $\mu A_{lr}+AS$ e RS , obtidos através do MDRM, aplicado às curvas carga-recalque do topo das estacas-teste.

Estaca	Ensaio	K_r (kN/mm)	y_1 (mm)	k	MDRM		INSTRUMENTAÇÃO	
					$\mu A_{lr}+AS$ (kN)	RS (kN/mm)	$\mu A_{lr}+AS$ (kN)	RS (kN/mm)
EOB	Lento	214	1,2	0,53	179	0,7	179	1,0
	Rápido	216	2,0	0,32	240	0,1	236	0,0
E1BI	Lento	259	5,3	0,14	273	1,2	273	1,3
	Rápido	259	1,3	0,54	440	0,1	422	0,0
E1BS	Lento	235	3,9	0,32	335	21,3	378	13,7
	Rápido	232	4,9	0,28	451	15,3	457	10,4
E2B1	Lento	322	4,4	0,20	365	11,1	362	10,7
	Rápido	342	4,7	0,13	585	25,5	536	24,6
E2B2	Lento	244	6,5	0,12	240	9,5	320	7,7
	Rápido	253	5,7	0,18	571	14,4	566	12,0

Os valores de $\mu A_{lr}+AS$ e RS , obtidos através do MDRM, estão indicados na Tabela 1. Nessa mesma tabela mostram-se esses mesmos parâmetros fornecidos pela análise dos resultados da instrumentação em profundidade, através de gráficos como os da Figura 3. Vê-se que há uma boa concordância entre eles, mostrando que existiu uma consistência muito boa entre os resultados da instrumentação no topo (defletômetros e células de carga) e em profundidade (“strain-gages”).

Provas de carga comuns

Analisaram-se provas de carga comuns, executadas em Maceió, Aracaju, Recife e João Pessoa, através da aplicação do MDRM às respectivas curvas carga-recalque no topo. Dessa forma, foram obtidos os parâmetros $\mu A_{lr}+AS$ e RS , por meio das expressões (16) e (17). Esses mesmos parâmetros foram estimados com base nos valores do SPT, através das expressões (2), (3) e (5). Por último, apresenta-se um procedimento para a estimativa da carga de trabalho e do recalque admissível, baseado nos dados do SPT, utilizando o MDRM (Método das Duas Retas Modificado).

A Tabela 2 mostra: a) as características geométricas das 21 estacas submetidas a provas de cargas comuns, de compressão; b) o local de execução dos ensaios; e c) os valores das cargas máximas de ensaio e os recalques correspondentes. Para todas as estacas adotou-se módulo de elasticidade da argamassa de 21×10^6 kPa.

Para aplicação do MDRM às provas de carga comuns e obtenção dos parâmetros $\mu A_{lr}+AS$ e RS , verificou-se a ordem de grandeza dos recalques. É necessário que durante o carregamento se desenvolva pelo menos uma parte da resistência de apoio (bulbo+ponta), referente ao trecho 4-5 da curva carga-recalque (Figura 5). Em geral, o recalque máximo da prova de carga deve ser de pelo menos 20mm, para um diâmetro nominal da estaca em torno de 40cm.

Utilizando-se as correlações entre os parâmetros de Cambefort e o SPT, expressões (2), (3) e (5), foi possível estimar os parâmetros $\mu A_{lr}+AS$ e RS , com $\mu=1$ (1º. carregamento). Deve-se lembrar (ver a Figura 6) que as correlações foram determinadas por retas ajustadas pelo limite inferior dos pontos referentes aos parâmetros R_b e R_p , A_b e A_p e $f_{máx}$. É de se esperar que essas correlações forneçam valores conservadores de $\mu A_{lr}+AS$ e RS .

A Figura 8 mostra os valores de $\mu A_{lr}+AS$ e RS fornecidos pelas correlações com o SPT, em função dos valores obtidos pela aplicação do MDRM às provas de carga. Confirma-se assim que as expressões (2)

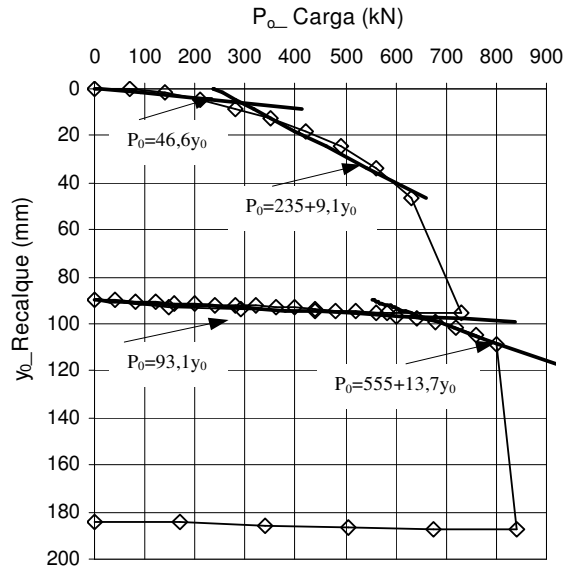


Figura 7. Aplicação do MDRM à estaca E2B2.

Tabela 2. Características geométricas das estacas, locais das provas de carga e valores de cargas e recalques máximos.

Estaca	Local	Nº bulbos	h_t (m)	h_f (m)	D_n (m)	K_r (kN/m)	$P_o^{máx}$ (kN)	$y_o^{máx}$ (mm)
M1	Maceió	2	14,0	12,0	0,40	220	1501	23,72
M2	Maceió	2	14,0	12,0	0,40	220	1580	40,64
M3	Maceió	2	10,5	8,5	0,40	311	1501	29,32
M5	Maceió	2	14,0	11,5	0,40	230	1501	35,68
M6	Maceió	2	16,5	15,0	0,40	176	1264	54,03
M7	Maceió	2	13,0	11,0	0,45	294	1422	38,88
M8	Maceió	1	6,0	4,5	0,40	586	1342	25,19
M10	Maceió	2	14,5	11,5	0,40	230	1682	45,2
J12	J. Pessoa	2	18,0	15,0	0,40	176	1501	48,51
A14	Aracaju	1	8,5	6,5	0,25	159	1013	20,51
A15	Aracaju	1	8,5	6,5	0,35	311	1506	32,78
A16	Aracaju	1	8,5	6,5	0,25	159	1013	49,86
A17	Aracaju	1	4,0	2,5	0,45	1336	1506	43,71
M19	Maceió	1	10,0	8,0	0,40	330	1531	45,72
M21	Maceió	1	13,5	11,0	0,40	240	1613	41,31
A22	Aracaju	1	3,4	1,9	0,40	1389	1090	55,00
A23	Aracaju	1	5,0	2,5	0,40	1056	1531	42,06
A24	Aracaju	2	9,0	5,0	0,40	528	1410	27,83
R25	Recife	1	14,0	9,5	0,30	156	600	29,90
R28	Recife	1	16,5	11,5	0,40	230	1612	24,15
M30	Maceió	2	13,5	10,0	0,40	211	1613	44,74

Legenda:

h_t : Altura total

h_f : Altura do fuste

D_n : Diâmetro nominal

subestimam os valores de RS. O mesmo ocorre, no geral, com as expressões (3) e (5) no que se refere aos valores de $\mu Alr+AS$. Além dos problemas habituais da medida do SPT, uma dificuldade adicional nas análises das estacas submetidas a provas de carga comuns residiu no desconhecimento de seus diâmetros reais após a sua execução. Estimar um diâmetro mais próximo do real, em função do diâmetro nominal da estaca e da resistência dos solos atravessados, pode, em alguns casos, conduzir a erros consideráveis.

Para a estimativa da carga de trabalho e do recalque admissível, aplicando o MDRM a partir dos resultados de sondagens, trabalhou-se com a carga referente a um recalque no topo de 20mm, segundo a fórmula:

$$P_0^{20mm} = (\mu \cdot Alr + AS) + RS \cdot y_0^{topo} \quad (24)$$

Essa fórmula é análoga à da expressão (19), com a substituição de μy_1 por y_0^{topo} . Lembra-se que essas estacas são muito rígidas e que, portanto, $y_0^{topo} \cong y_{ponta} = 20mm$. Os termos $\mu Alr + AS$ e RS foram estimados através das expressões (2), (3) e (5), com $\mu=1$ (1º carregamento).

Para determinação da carga de trabalho recorreu-se à norma NBR-6122 que recomenda aplicar um coeficiente de segurança igual a 2 à capacidade de carga obtida por métodos empíricos ou semi-empírico, sem a execução de prova de carga. Isto é:

$$P_0^{trab} = \frac{P_0^{20mm}}{2} \quad (25)$$

De posse do valor da carga de trabalho, foi feita uma comparação com a carga referente ao ponto 04 (P_{04}) da curva carga-recalque no topo, já citada anteriormente, expressão (19). Para o uso dessa equação, adotou-se $y_1=7mm$ com base nas análises das curvas P_0-y_0 das 21 estacas, através do MDRM.

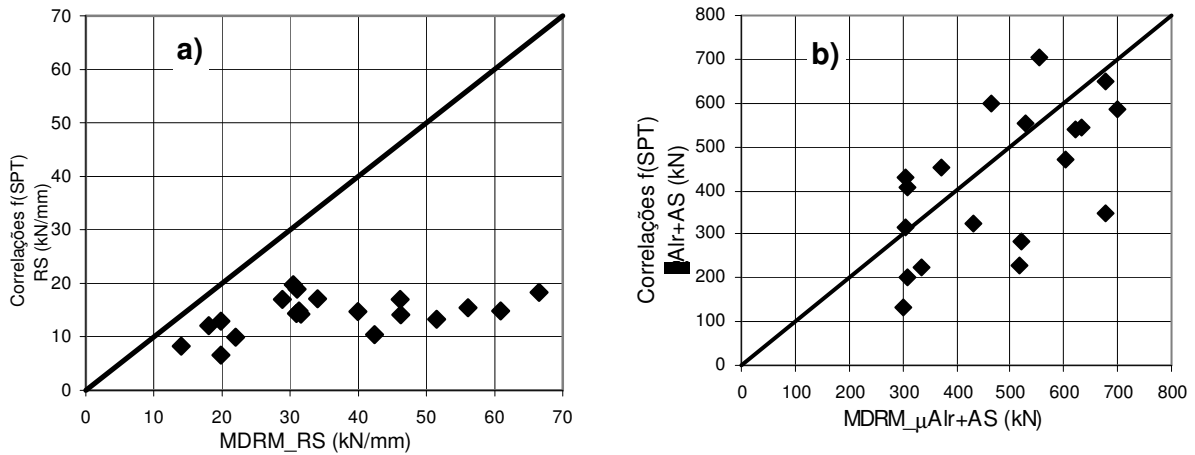


Figura 8. Correlações $f(SPT)$ x MDRM: a) RS; b) $\mu Alr + AS$.

Da comparação da carga de trabalho com a carga associada ao ponto 04, pode-se indicar um limite superior para o recalque admissível das estacas, como segue:

a) se $P_0^{trab} > P_{04}$, então,

$$y_0^{trab} = \frac{P_0^{trab} - d_1}{d_2} \quad (26)$$

em que d_1 e d_2 são determinadas através das expressões (16) e (17); e:

b) se $P_0^{trab} \leq P_{04}$, então,

$$y_0^{trab} \leq 7mm$$

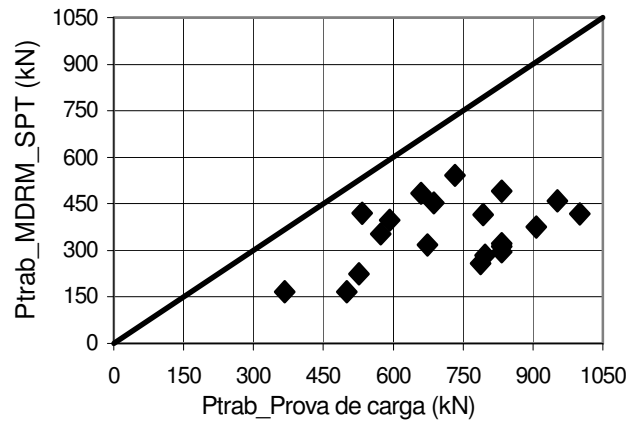


Figura 9. Carga de trabalho obtida da prova de carga e do MDRM.

A Figura 9 mostra a carga de trabalho segundo o MDRM (expressão 24), em função da carga de trabalho obtida da prova de carga. Esta última foi determinada pelo menor valor entre a carga máxima atingida na prova de carga dividida pelo coeficiente de segurança de 1,6, e o valor da carga correspondente ao recalque de 20mm, dividida pelo coeficiente de 1,5. Esses 20mm foram adotados com base na experiência local com esse tipo de estaca. Verificam-se valores conservadores de carga de trabalho segundo o MDRM, o que era de se esperar pois, como já foi mencionado anteriormente, as correlações para a determinação dos termos μ_{Alr+AS} e RS referem-se ao limite inferior dos parâmetros de Cambefort. Além disso, há uma dose de conservadorismo implícita na NB, ao estipular um coeficiente de segurança igual a 2 na expressão (25).

CONCLUSÕES

Os resultados da instrumentação em profundidade, de 5 estacas-teste com bulbos, possibilitaram a determinação dos parâmetros de Cambefort, que foram correlacionados com o SPT, pelos valores mínimos, postura propositalmente conservadora. Para a 2ª Relação de Cambefort, referente tanto ao bulbo quanto à ponta, constatou-se uma reação de apoio (bulbo e ponta) inicial não nula, isto é, $A \neq 0$. Tal fato permitiu construir um modelo matemático simples para a interpretação da curva carga-recalque no topo de estacas rígidas, com bulbos, denominado “Método das Duas Retas Modificado” (MDRM), o qual é uma extensão do Método das Duas Retas, desenvolvido anteriormente.

O MDRM permitiu estimar os parâmetros μ_{Alr+AS} (atrito lateral na ruptura majorado pela carga residual na ponta e pela parcela inicial da reação de ponta) e RS (parcela de reação de apoio, bulbo + ponta, para deslocamento unitário da ponta) diretamente das curvas carga-recalque no topo. Para as 5 estacas-teste, esses parâmetros, assim calculados, aproximaram-se bem dos obtidos diretamente da instrumentação em profundidade, que, portanto, mostrou-se consistente com a instrumentação no topo. Para as outras 21 estacas os parâmetros μ_{Alr+AS} e RS, estimados com base nas correlações com o SPT, ficaram abaixo dos valores obtidos através da aplicação do MDRM às provas de carga comuns, face à citada postura conservadora,.

Estimaram-se a carga de trabalho e o recalque admissível das 21 estacas, submetidas a provas de carga comuns, aplicando o MDRM a partir dos resultados de sondagens. Os valores calculados revelaram-se também serem conservadores quando comparados às cargas de trabalho obtidas diretamente das provas de carga. O desconhecimento das dimensões reais das estacas após a sua execução é uma das grandes dificuldades em se utilizar as correlações propostas. Problemas na medida do SPT também podem aumentar as dispersões dos resultados.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT (1996).: Projeto e Execução de Fundações: NBR 6122/96. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT (1991). Estacas. Prova de Carga Estática: NBR 12131/91. Rio de Janeiro.
- DÉCOURT, L. (1996) Análise e Projeto de Fundações Profundas. Estacas. In: HACHICH, W., FALCONI, F.F., SAES, J.L., FROTA, R.G.Q., CARVALHO, C.S., NIYAAMA, S. Fundações Teoria e Prática. 1. ed. São Paulo: Editora Pini. Cap8.1. p.265-301.
- LAZO, G. (1996). Previsão do Comportamento de Estacas Pré-Moldadas na Região da Grande São Paulo, Brasil, por meio de Modelos Matemáticos. São Paulo. Dissertação de Mestrado. – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 222p.
- MARQUES, J.A.F. (1997). Execução e Previsão de Capacidade de Carga de Estacas Rotativas-Injetadas. EESC, São Carlos, dissertação (mestrado), 124p.
- MARQUES, J.A.F. (2004). Estudos de Estacas Escavadas de Pequeno Diâmetro, com Bulbos, Instrumentadas em Profundidade, em Terrenos Sedimentares. Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 319p.
- MASSAD, F.; LAZO, G. (1998). Método gráfico para interpretar a curva carga – recalque de provas de carga verticais em estacas rígidas e curtas. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 11º, Brasília/DF. Anais, A.B.M.S. v3. p. 1407-1414.
- MASSAD, F. (1992). Sobre a Interpretação de Provas de Carga em Estacas, Considerando as Cargas Residuais de Ponta e a Reversão do Atrito Lateral. Parte I: Solos Relativamente Homogêneos. Revista Solos e Rochas, v.15 (2), p.103-115, São Paulo.