

CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DOS FATORES QUE INFLUENCIAM NO RECALQUE E DISTRIBUIÇÃO DE CARGAS NO GRUPOS DE ESTACAS

Wandemyr Mata dos Santos Filho^{*1}

Celso Romanel^{*2}

Stoessel Farah Sadalla Neto^{*3}

RESUMO: Em muitos dos métodos avaliáveis de previsão, o recalque do grupo de estacas é relacionado ao recalque de uma estaca isolada, com um comportamento similar a uma estaca pertencente ao grupo, carregada no mesmo solo que o grupo. A extrapolação do recalque de uma estaca isolada para um grupo de estacas pode ser o fator mais restritivo nesta análise, desde que, algumas vezes, somente a geometria do grupo seja levada em consideração.

Neste trabalho são apresentadas considerações a respeito dos principais fatores que influenciam na avaliação do recalque e distribuição de cargas no grupos de estacas, tais como : as características do solo e da estaca e os relacionados a geometria das estacas e do grupo de estacas.

1. INTRODUÇÃO

O mecanismo de transferência de carga, bem como a distribuição de recalque dentro de um grupo de estacas, envolve um sistema de interações de estacas, bloco de estacas e o solo ao redor, altamente complexo. O processo é afetado pelo tempo da relação tensão-deformação e características específicas de rupturas de todos os elementos do sistema, o qual referindo-se ao solo, pode suportar mudanças induzidas pelas interações das diversas situações das estacas.

A relação carga-recalque de um grupo de estacas é afetada por fatores tais como, a natureza do carregamento, as propriedades do solo, a instalação da estaca, a geometria do grupo e a interação entre diferentes elementos do grupo.

Infelizmente, devido a incerteza ou dificuldade na quantificação desses fatores, não existe ainda um

método de previsão avaliável capacitado que inclua exatamente todos esses fatores.

Durante muito tempo, os projetos de fundação em estacas foram baseados em uma combinação de empirismo e experiência. Somente nas últimas décadas, em função do desenvolvimento de técnicas simplificadas e eficazes na realização de projetos de fundação, é que se conseguiu verificar um grande avanço, visando com isso uma gradual mudança na utilização dos procedimentos de projetos com base em métodos considerados empíricos para métodos com um embasamento mais teórico.

Fatores como, uma maior frequência da utilização de estacas em projetos de fundação, o advento de computadores mais sofisticados, assim como o desenvolvimento de técnicas modernas poderosas, bem como o reconhecimento de que fundação em estaca recalca, e que tais deslocamentos devem ser controlados,

^{*1} Eng. Civil M.Sc. Geotecnia – CEFET/PA – Centro Federal de Educação Tecnológica, Pesquisador Associado do Grupo de Pesquisas em Geotecnia Ambiental da Universidade da Amazônia (GEA-UNAMA) e Professor do Curso de Engenharia Civil da UNAMA.

^{*2} Eng. Civil Ph.D. Geotecnia - Pontifícia Universidade Católica, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, RJ

^{*3} Eng. Civil M.Sc. Geotecnia, Coordenador do Grupo de Pesquisas em Geotecnia Ambiental da Universidade da Amazônia (GEA-UNAMA) e Professor do Curso de Engenharia Civil da UNAMA.

serviram de estímulos na realização dessas mudanças.

Em condições normais de trabalho, o recalque de um grupo de estacas depende fundamentalmente de duas classes de parâmetros:

- a) Aqueles relacionados com as propriedades do solo e dos materiais das estacas;
- b) Aqueles relacionados com a geometria das estacas e do grupo.

A importância dos parâmetros da primeira classe é expressa através do fator de rigidez K , do índice E_b/E_s (módulo de elasticidade da camada do solo logo abaixo da ponta da estaca em relação ao módulo de elasticidade do solo ao longo do fuste), da distribuição do módulo de elasticidade do solo E_s com a profundidade, etc.

Os principais fatores geométricos que afetam o recalque de grupos de estacas por sua vez são: a geometria do grupo, o comprimento relativo L/d , o espaçamento relativo s/d , a espessura relativa do estrato h/L , e a rigidez do bloco.

2. GEOMETRIA DO GRUPO

Fleming et al. (1985), apresentaram resultados para um grande número de estacas, sugerindo que o índice de recalque do grupo R_s , pode ser dado aproximadamente como :

$$R_s \approx n^w \quad (01)$$

onde n é o número de estacas no grupo e w um expoente variando entre 0.4 e 0.6 na maioria dos casos.

Poulos (1989) comenta que esta expressão fornece valores bastante razoáveis. Para um grupo de estacas com bloco infinitamente rígido, notar que o índice de recalque é independente da configuração geométrica do grupo; por exemplo, para um caso de 16 estacas, R_s , é bastante similar na configuração 8×2 ou 4×4 .

O fator de eficiência de recalque (ou fator de redução de recalque) R_g é, no entanto, significativamente dependente da largura do grupo de estacas. Para grupos com mais de nove estacas, existe uma relação única (fig. 01).

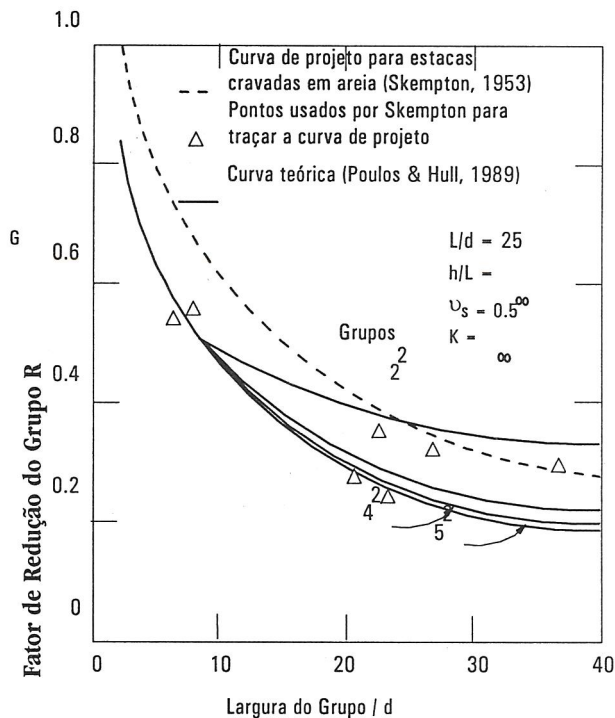


Figura 01 - Fator de redução do grupo R_g variando com a largura do bloco (Apud Poulos, 1989)

Portanto, no projeto de grupos de estacas, o uso de um menor número de estacas com espaçamentos relativos grandes é geralmente a solução mais eficiente do que um número maior de estacas com espaçamentos menores. Entretanto, em problemas práticos pode existir um limite para o espaçamento entre as estacas dos grupos, acima do qual é difícil construir-se blocos com determinada rigidez.

3. COMPRIMENTO RELATIVO L/D

Muitas comparações publicadas com valores de recalques baseiam-se principalmente na razão L/d .

Poulos (1968) adotando valores de $s/d = 4.0$ e $K = 1000$, apresentou o gráfico da figura 02 mostrando a variação do índice de recalque R_s com a razão L/d e o número de estacas n , para um grupo de estacas quadrado em um estrato de espessura $h = 2.L$, cujo módulo de elasticidade aumenta linearmente com a profundidade (solo de Gibson).

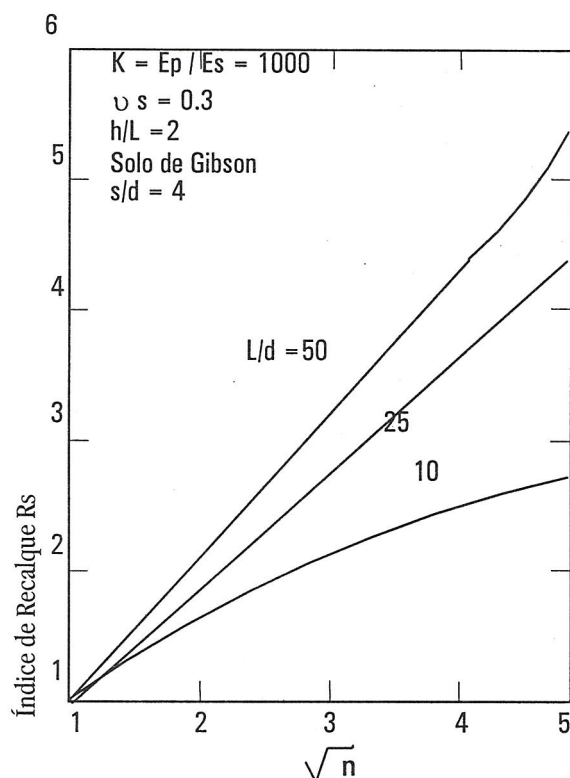


Figura 02 - Efeito da distribuição de E_s no índice de recalque R_s (Apud Poulos, 1977)

Desta figura, verifica-se que o índice de recalque R_s , aumenta quando L/d e n aumentam ambos. De uma maneira geral, a influência de L/d decresce para valores acima de 25.

4. ESPAÇAMENTO RELATIVO S/D

Butterfield & Banerjee (1971) comentam que o efeito de grandes espaçamentos relativos s/d tende a reduzir o valor do recalque para o caso de grupos de estacas com comprimento relativo $L/d \leq 25$.

Com relação à distribuição de carga por estaca, Poulos (1968), observa que para pequenos valores de espaçamentos relativos, as estacas mais externas são as mais carregadas. De acordo com o aumento de s/d a distribuição de cargas no grupo tende a ser mais uniforme.

5. ESPESSURA RELATIVA H/L

Poulos (1968) comenta que para pequenos espaçamentos, a presença de uma base rígida tende a aumentar o valor de recalque diferencial r_d em um grupo com bloco perfeitamente flexível. Com o aumento no espaçamento relativo observa-se uma diminuição deste recalque diferencial mais rapidamente do que no caso do mesmo grupo em um semi-espaço.

Com relação a distribuição de carga por estaca, aquele autor também observa que para pequenos valores de h/L , a distribuição tende a ser mais uniforme e independente do espaçamento relativo s/d .

5.1. APROXIMAÇÃO DE STEINBRENER PARA ESTRATO DE SOLO

No caso de estrato de solo de espessura h , os fatores de influência de recalque podem ser calculados através da aproximação de Steinbrenner (1934), isto é:

O fator de influência $I_{ij}(h)$ do elemento i devido à tensão cisalhante aplicada no elemento j , considerando-se o grupo de estacas no estrato de espessura h é aproximado por:

$$I_{ij}(h) = I_{ij}(\infty) - I_{hj}(\infty) \quad (02)$$

onde:

$I_{ij}(\infty)$ = fator de influência do elemento i devido às tensões aplicadas no elemento j , considerando o grupo de estacas no semi-espaço.

$I_{hj}(\infty)$ = fator de influência do ponto situado na profundidade h , diretamente abaixo do elemento i , devido às tensões cisalhantes aplicadas no elemento j , considerando o grupo de estacas no semi-espaço.

5.2. MÉTODOS DAS IMAGENS PARA ESTRATO DE SOLO

A análise do comportamento de grupos de estacas em estratos de espessura h pode também ser

procedida através do método das imagens, sugerido por D'Appolonia & Romualdi (1963).

Este método consiste basicamente em considerar que o elemento da estaca real j , sobre o qual tensões cisalhantes reais p_j estão atuando, possa ser simultaneamente refletido pela base do estrato, assim criando um elemento de estaca imaginário j' , sobre o qual atuam tensões cisalhantes $p_j' = kp_j$ ($0 \leq k \leq 1$), de sinal contrário ao das tensões reais. No caso de grupos de estacas flutuantes, k assume o valor nulo; no caso de grupos de estacas de ponta, o valor de k passa a ser igual a 1.0. Soluções intermediárias ($0 < k < 1$) possibilitam a análise do comportamento de grupos de estacas flutuantes em um estrato de solo, onde k é um fator que deve ser também determinado como parte da análise.

6. ASPECTOS REFERENTES AO BLOCO

Um dos fatores também considerados no projeto de grupos de estacas refere-se à rigidez relativa do bloco e seu posicionamento em relação à superfície do terreno.

Com relação à rigidez relativa duas situações limites são normalmente consideradas em estudos teóricos do comportamento de fundações: bloco perfeitamente flexível e bloco infinitamente rígido.

6.1. BLOCO INFINITAMENTE RÍGIDO

No caso de bloco infinitamente rígido, as seguintes considerações devem ser feitas na análise de recalque e distribuição de carga por estaca no grupo:

a) Os recalques de topo de todas as estacas pertencentes ao grupo são iguais (ρ_R) admitindo-se que a resultante das forças aplicadas sobre o bloco é cêntrica;

b) A somatória das cargas aplicadas no topo de todas as estacas é igual ao carregamento total aplicado no bloco, desconsiderando-se no caso o peso próprio do bloco.

Ao se considerar recalques iguais nas estacas no grupo, observa-se que, para tal fato ocorra, as estacas devem receber, dependendo da geometria do grupo, diferentes carregamentos. Alguns aspectos também influenciam nesta distribuição de carga: o índice de s/d ,

d , a espessura relativa do estrato h/L , a relação L/d , entre outros.

Para pequenos espaçamentos relativos s/d , Poulos (1968) comenta que a carga nas estacas mais externas do grupo é consideravelmente maior do que a carga média $P_{méd}$, enquanto que nas estacas mais centrais é menor do que o valor de $P_{méd}$, podendo ser mesmo negativa (embora seja duvidosamente aceitável que cargas negativas ocorram em casos práticos). Com o aumento no espaçamento relativo, a distribuição de cargas tende a se uniformizar.

O efeito da espessura relativa do estrato h/L , tende a provocar uma distribuição mais uniforme de carga por estaca à medida que o seu valor diminui.

Com relação ao comprimento relativo da estaca L/d , Poulos (op. cit) verifica que para estacas curtas ($L/d \leq 10$) a distribuição de carga é mais uniforme do que no caso de estacas esbeltas ($L/d \geq 100$). A influência do comprimento relativo é, no entanto, pouco significativa comparada com os efeitos do espaçamento s/d e espessura h/L , comentados anteriormente.

O efeito do contato do bloco infinitamente rígido com a superfície do terreno no valor do recalque é relativamente pequeno, a menos que os espaçamentos entre as estacas sejam grandes e o número de estacas do grupo for relativamente pequeno para a geometria do bloco.

Observa-se que mesmo para o caso de espaçamentos não muito usuais, como p.ex. espaçamentos relativos iguais ou menores a $10d$, a redução no recalque devido ao contato do bloco com o solo é inferior ao valor de 5 %.

Portanto, para a maioria das situações práticas, a influência no recalque sob condições normais de cargas de trabalho, pode ser ignorada.

6.2. BLOCO PERFEITAMENTE FLEXÍVEL

Bloco perfeitamente flexível, é caracterizado por:

a) A carga em todas as estacas do grupo são iguais, independentemente da configuração do bloco (P_c/n);

b) Recalques diferenciais entre estacas do grupo tendem a ocorrer.

6.2.1. RECALQUE MÁXIMO $\rho_{\max}$

Para um grupo de estacas quadrado (fig. 03), considera-se que o recalque máximo $\rho_{\max}$ ocorre na estaca central (estacas nº 3).

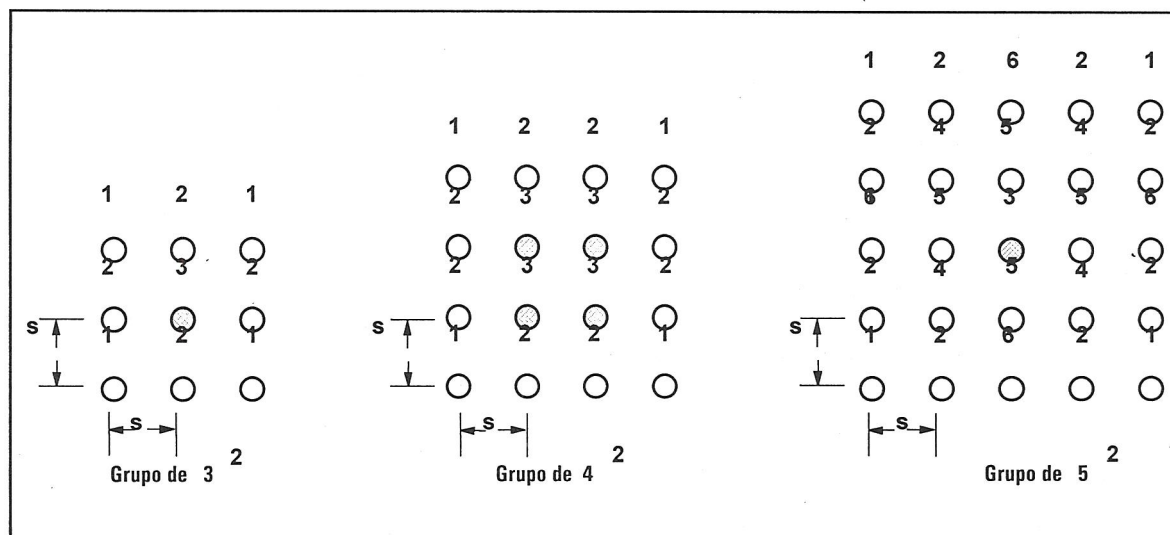


Figura 03 - Identificação das estacas num grupo de estacas quadrado

Poulos (op. cit) observa que para grandes espaçamento entre estacas que o recalque máximo $\rho_{\max}$, considerando bloco perfeitamente flexível, é bastante próximo ao recalque do grupo ρ_R , considerando bloco infinitamente rígido.

Para a maioria dos casos práticos, a relação $\rho_{\max}/\rho_R$ é praticamente independente do espaçamento relativo entre estacas, desde que $s/d \leq 20$.

O efeito em $\rho_{\max}/\rho_R$ da espessura relativa do estrato h/L é pequeno para baixos valores de espaçamentos relativos, diminuindo rapidamente porém com a redução de h/L para casos onde $s \geq 10 d$.

O comprimento relativo L/d exerce comparativamente pouca influencia no valor de $\rho_{\max}/\rho_R$, diminuindo à medida em que L/d aumenta.

6.2.2. RECALQUE DIFERENCIAL

MÁXIMO r_d

Para grandes espaçamentos relativos entre estacas, o recalque diferencial tende a ser nulo,

crescendo à medida em que s/d diminui, atingindo seu valor máximo para $s/d \leq 15$ (Poulos, 1968).

A razão $\rho_d/\rho_{\max}$ aumenta de acordo com o número de estacas do grupo; no caso de grupo de 5², por exemplo, $\rho_d/\rho_{\max} \cong 0.30$.

Em espaçamentos relativos considerados pequenos, o efeito da espessura relativa h/L no valor de $\rho_d/\rho_{\max}$ tende a ser mais significativo. Para o caso de uma camada de solo semi-infinita a relação $\rho_d/\rho_{\max}$ diminui rapidamente com o aumento do espaçamento relativo s/d .

Já o efeito da razão L/d é similar a da espessura relativa h/L . Em pequenos espaçamentos relativos s/d , o valor de $\rho_d/\rho_{\max}$ tende a aumentar para estacas curtas ($L/d \leq 10$). No caso de estacas esbeltas ($L/d \geq 50$) o efeito do comprimento relativo L/d tende a aumentar a razão $\rho_d/\rho_{\max}$, para grandes valores de espaçamentos relativos s/d .

7. CONCLUSÃO

Apesar da grande variedade de fatores que influenciam no comportamento de recalque e distribuição de recalque de grupos de estacas, na escolha de uma técnica mais apropriada para solução de um problema prático, os seguintes fatores ainda devem ser levados em consideração:

- a) A importância e a escala do problema;
- b) O custo do projeto de fundação ;
- c) Os índices geotécnicos disponíveis ;
- d) A complexidade do perfil geotécnico e das condições de carregamento ;
- e) O estágio do projeto (ou seja, se o projeto está na fase considerada como ante- projeto ou se já é o projeto final para a solução do problema) ;
- f) E principalmente a experiência do projetista com os métodos que estão sendo considerados.

Vale ressaltar que ainda, pelos mais variados motivos, muitos projetistas preocupam-se unicamente na escolha de qual dos métodos deve ser utilizado na execução de um projeto de fundação de estacas, entretanto, Poulos (1989) lembra que a obtenção de parâmetros geotécnicos e a idealização do perfil do solo adequado são fatores considerados mais importantes do que os métodos a serem aplicados.

8. BIBLIOGRAFIAS CONSULTADAS

- BUTTERFIELD, R., BANERJEE, P. K. The problem of pile Group: pile Cap interaction, *Géotechnique*. S.l. , v. 21, n.2, 1971, p. 135 - 142.
- BUTTERFIELD, R., BANERJEE, P. K. The elastic analysis of compressible piles and piles groups. *Géotechnique*. Vol. 21, N - 01, 1971, p. 43 - 60.
- D'APPOLONIA, E. , ROMUALDI, J. P. Load transfer in end-bearing steel H-piles. *JSMFD, ASCE*. S.l., v. 89, 1963, pp. 1 - 25.
- FLEMING, W. G. K., WELTMAN, A. J., RANDOLPH, M. F. **Piling Engineering**, New York: Survey University Press, Halsted Press, 1985.
- GIBSON, R. E. The analytical method in soil mechanics. *Géotechnique*. S.l., v. 24, n.2, 1974, p. 115 - 140.
- POULOS, H. G. , DAVIS, E. H., The settlement behaviour of single axially loaded incompressible piles and piers. *Géotechnique*. S.l., v. 18, n.3, 1968, p. 351 - 371.
- POULOS, H. G. , HULL, T. S. The role of analytical geomechanics in foundation engineering, Proc. Am. Soc. Civ. Engrs, Foundation Engng. Congress, Chicago, 1989. *Géotechnique*. S.l., v.18, n.3, 1968, p. 351 - 371.
- POULOS, H. G. , MATTES, N. S. The behaviour of axially loaded end-bearing piles, *Géotechnique*, v. 19, n.2, 1969, p. 285 - 300.
- POULOS, H. G., Modified calculation of pile-group settlement interaction, *Journal of Geotechnical Engineering, S.l.*, v. 114, n.6, Jun., 1988, p. 697 - 705.