

GRUPOS DE ESTACAS SUBMETIDOS A CARREGAMENTO HORIZONTAL EM CENTRIFUGADORA

Pile group subjected to horizontal loading in centrifuge

JOSÉ CARLOS ANGELO CINTRA*

JACQUES GARNIER**

DANIEL LEVACHER***

RESUMO — Relata-se um estudo paramétrico de grupos de 2 e 3 estacas, escavadas e cravadas, com espaçamento variando de 1 a 10 diâmetros, submetidos a carregamento horizontal em centrífuga.

SYNOPSIS — A parametric study of 2 and 3 bored and driven pile groups, with spacing varying from 1 to 10 diameters, subjected to horizontal loadings in a centrifuge is presented.

1 — INTRODUÇÃO

O comportamento de um grupo de estacas solicitadas horizontalmente torna-se complexo pelo carácter tridimensional do problema, pela não linearidade da interacção solo-estrutura e pelo efeito de grupo. Daí a necessidade da realização de ensaios específicos, *in situ* ou em laboratório.

Os ensaios em verdadeira grandeza apresentam, contudo, um custo praticamente proibitivo, enquanto os ensaios em modelos reduzidos, sob gravidade normal ($1g$), não produzem em Geotecnia o mesmo comportamento tensão-deformação do protótipo. A solução já consagrada mundialmente é a centrifugação dos modelos (ensaios realizados a ng em modelos reduzidos à escala $1/n$), o que reproduz os mesmos níveis de tensão do protótipo.

A partir do início da década de 80, sobretudo, em diversos países a modelação em centrífuga passou a ser amplamente utilizada em Mecânica dos Solos. Destacam-se as pesquisas sobre fundações superficiais e profundas, muros de suporte, solos reforçados, obras subterrâneas, escavações, aterros, barragens, taludes, ancoragens, interacção solo-estrutura e problemas dinâmicos.

A utilização deste equipamento sofisticado, na análise de modelos geotécnicos reduzidos, é justificável por três motivos principais:

- a) As experiências realizadas sob gravidade normal não permitem satisfazer as condições de semelhança entre modelo e protótipo;

* Professor da Universidade de São Paulo, Campus de São Carlos, Brasil

** Chefe da Secção de Modelagem em Centrífuga, LCPC, França

*** Investigador Visitante, LCPC, França

- b) Os métodos numéricos, embora tenham alcançado alto grau de desenvolvimento nos últimos tempos, não se constituem em meio de estudo privilegiado em Mecânica dos Solos, em razão da complexidade das leis de comportamento dos materiais;
- c) As dificuldades, por demais conhecidas, existentes nos ensaios in situ.

As centrífugas, portanto, ao possibilitarem a realização de ensaios sobre modelos reduzidos, satisfazendo às leis de semelhança, constituem-se actualmente em excelente via de pesquisa complementar às análises teóricas e numéricas e às experiências sobre obras em verdadeira grandeza. Os inúmeros resultados já obtidos atestam com clareza tal afirmação (Corté, 1988).

2 — PRINCÍPIO DOS ENSAIOS POR CENTRIFUGAÇÃO

Para se observar o mesmo comportamento do protótipo sobre um modelo em escala reduzida, é necessário respeitar as condições de semelhança entre as diversas grandezas físicas envolvidas.

Na formulação dessas condições de semelhança, geralmente utiliza-se o conceito de “escala” de uma grandeza física. Deste modo, define-se σ^* a escala de tensões, ou seja, a relação entre a tensão no protótipo e no modelo, $\sigma^* = \sigma_p / \sigma_m$, e de matéria análoga, ρ^* a escala de massas específicas, g^* a escala de forças de massa, e l^* a escala de dimensões lineares.

Para os meios contínuos, Mandel (1962) demonstra que as equações de equilíbrio são verificadas se:

$$\sigma^* = \rho^* g^* l^* \quad (1)$$

Em Mecânica dos Fluidos, por exemplo, as experiências são frequentemente realizadas nas condições ambientes ($g^* = 1$), mas os materiais do protótipo são substituídos de modo a satisfazer as condições de semelhança.

Em Mecânica dos Solos, entretanto, a complexidade das leis de comportamento dos solos não permite a substituição dos materiais, devendo então o modelo reduzido ser construído com o mesmo solo do protótipo. Assim, com a utilização do mesmo material ($\rho^* = 1$) e desejando conservar o mesmo nível de tensões ($\sigma^* = 1$) para fazer intervir as mesmas relações tensão-deformação, eventualmente desconhecidas, é necessário que:

$$g^* l^* = 1 \quad (2)$$

Assim, pode-se obter a semelhança entre protótipo e modelo aumentando-se as forças de massa na proporção inversa da escala de dimensões lineares, através da centrifugação do modelo ($g^* = 1/l^*$). É o princípio dos ensaios em centrífuga. Um modelo reduzido à escala 1/100, por exemplo, deve ser submetido a uma aceleração de 100 vezes a gravitacional (100 g).

Contrariamente, nos ensaios sob gravidade normal ($g^* = 1$), e levando em conta que ρ^* não é muito diferente de 1 mesmo que se consiga a substituição do material, obtém-se:

$$\rho \cong l^* \quad (3)$$

o que significa que as tensões no modelo serão muito mais fracas do que no protótipo, não sendo possível, portanto, simular o comportamento do solo, que depende do nível de tensões.

Pilot (1975) menciona que o aumento das forças de inércia, por uma outra via que não a centrifugação, é utilizado há muito tempo em Mecânica dos Solos na determinação do limite de liquidez. Com efeito, neste ensaio provoca-se a ruptura de um talude, em modelo fortemente reduzido, quando se produz o choque da concha sobre o pedestal do aparelho de Casagrande.

Para uma altura H de 13 mm desse “talude”, e admitindo a coesão não drenada da argila $c_u = 1 \text{ kN/m}^2$, o número de estabilidade à ruptura

$$c_u / \gamma H = 0,19 \quad (4)$$

implica $\gamma = 405 \text{ kN/m}^3$, o que corresponde a uma aceleração de cerca de 20 g.

3 — HISTÓRICO

A técnica de centrifugação de modelos reduzidos de obras de terra e fundações surgiu, simultaneamente, nos Estados Unidos e na União Soviética, no início da década de 1930.

A primeira centrifugadora americana, de porte bem pequeno (raio de 0,20 m), foi utilizada por Bucky na Universidade de Columbia, no estudo de estabilidade de tectos de minas. Esta actividade em Mecânica das Rochas não teve, porém, grande repercussão e somente a partir dos anos 70 a modelação em centrifugadora conheceu um real desenvolvimento nos EUA.

Ao contrário, as experiências pioneiras em centrifugadora realizadas em Moscovo, por Davidenkov e Pokrovsky, desenvolveram-se rapidamente. Os resultados obtidos em modelos reduzidos centrifugados foram logo utilizados em projectos de barragens, aterros e diques. Em artigo apresentado ao 1.º Congresso Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações em 1936, Pokrovsky e Federov mostraram o esquema de uma centrifugadora, registaram a existência deste tipo de equipamento em quatro instituições soviéticas, com raios de 0,80 a 1,50 m, e relataram a sua utilização nos estudos de estabilidade de taludes, distribuição de tensões em fundações, condutas enterradas e assentamentos de fundações. Nos 30 anos seguintes, foram instaladas diversas outras centrifugadoras especializadas para estudos geotécnicos, nos diferentes órgãos de pesquisa soviéticos. Todavia, o conjunto de trabalhos soviéticos, publicados em idioma russo, permaneceu desconhecido do resto do mundo até aos anos 60, quando traduções foram feitas na Inglaterra (Schofield, 1980).

Ainda na década de 60, surgiram as primeiras centrifugadoras em outros países: Japão, África do Sul e Inglaterra. E a partir da década de 70: França, Alemanha, China, Dinamarca, Israel, Itália, Holanda e Canadá.

Os anos 80 foram marcados pela eclosão de uma nova geração de instalações, da qual faz parte a centrifugadora do LCPC — Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, em França — de concepção mais elaborada que as precedentes e de maior capacidade. Inaugurada em 1985, a centrifugadora do LCPC tem um raio de 5,50 m, pode ser submetida a uma aceleração máxima de 200g, e ensaiar modelos até 20 kN (Corté et al., 1986).

Ressalte-se, finalmente, o aumento da complexidade nas experiências, graças aos avanços ocorridos na instrumentação e na electrónica. As primeiras experiências limitavam-se a observar o estado do modelo após a centrifugação. Numa segunda etapa, o modelo passou a ser instrumentado e seu comportamento observado durante a centrifugação. Actualmente, pode-se intervir sobre o modelo durante a centrifugação, como por exemplo, realizar provas de carga em fundações.

4 — PROGRAMA DE PESQUISA

Na centrífugadora do LCPC, está em andamento um amplo programa de ensaios em grupos de estacas carregadas horizontalmente, cuja fase preliminar é apresentada neste artigo. Outros detalhes encontram-se em Cintra (1989).

Trata-se de um estudo paramétrico de grupos de duas estacas, escavadas ou cravadas, e grupo de três estacas escavadas, com espaçamentos entre estacas variando de 1 a 10 vezes o diâmetro, de centro-a-centro. A Fig. 1 mostra a direcção do carregamento em ambos os casos.



Fig. 1 — Configuração e direcção do carregamento

As estacas são metálicas, fechadas na ponta, com 8 mm de diâmetro externo, 1 mm de espessura e 300 mm de comprimento, que centrifugadas a 40 g correspondem a um protótipo de 0,32 m de diâmetro externo e 12 m de comprimento.

Como solo-tipo utilizou-se a areia de Fontainebleau, fina, branca, seca, mal graduada, cujos pesos específicos mínimo e máximo são $13,9 \text{ kN/m}^3$ e $16,6 \text{ kN/m}^3$, respectivamente. Adoptou-se a compactidade relativa de 70%, que, é obtida na constituição do maciço pelo método da “chuva de areia”. Nesta compactidade a areia apresenta um ângulo de atrito interno de 34° .

Para cada conjunto de ensaios o maciço de areia era preparado num contentor rectangular de dimensões internas $0,80 \text{ m} \times 1,20 \text{ m}$ e altura 0,36 m. As estacas eram implantadas no contentor de modo a possibilitar a realização de provas de carga em duas estacas isoladas, como referência, e em grupos de estacas de até seis diferentes espaçamentos: 1, 2, 4, 6, 8 e 10 diâmetros. Para cada espaçamento eram previstos dois grupos para verificação da repetibilidade dos resultados.

5 — PREPARAÇÃO DOS MODELOS

Inicialmente as estacas eram posicionadas no contentor, suspensas por um fio de pesca e presas por clips, formando os diferentes grupos com os espaçamentos desejados. Em seguida a areia era despejada pelo método da chuva de areia, constituindo o maciço até à cota prevista. Esta sequência empregada na preparação dos modelos visava reproduzir o caso de estacas escavadas, ou estacas implantadas sem deslocamento do solo.

Para o caso de estacas cravadas, após a constituição do maciço as estacas eram implantadas individualmente através de um sistema de operação manual que compreendia uma guia, uma haste e um martelo de massa igual à da estaca (50 gramas), caindo em queda livre de uma altura de 100 mm. Saliente-se que, se o objectivo fosse a realização de provas de carga vertical, a cravação das estacas deveria ocorrer durante a centrifugação e não sob gravidade normal.

Em todos os contentores as estacas apresentavam uma ficha de 200 mm e suas pontas ficavam a 65 mm do fundo do contentor. O controle de compactidade era verificado através de cápsulas colocadas no interior do maciço.

6 — PROVAS DE CARGA

Embarcado o contentor na centrífuga, realizavam-se as provas de carga a 40g. Para possibilitar a aplicação da carga total, uma placa metálica convenientemente furada era instalada em cada grupo, a 45 mm do nível do solo.

As provas de carga eram realizadas em estágios de 20 N (estaca isolada), 40 N (grupo de duas estacas) ou 60 N (grupo de três estacas), e conduzidas até à ruptura ou a um deslocamento excessivo. Em cada estágio a carga era mantida durante 1 minuto e os deslocamentos horizontais eram obtidos por meio de medidores instalados à superfície do solo.

7 — RESULTADOS OBTIDOS

Realizado o conjunto de provas de carga de um mesmo contentor adoptou-se o seguinte procedimento na construção do gráfico de efeito de grupo: para uma dada carga horizontal por estaca, $FH = 100$ N, obteve-se por cada grupo o deslocamento horizontal ao nível do solo, y_0 , encontrando-se a variação de y_g em função do espaçamento entre estacas. Nas Figs. 2 a 4 são apresentados estes gráficos de efeito de grupo para os três contentores ensaiados. Como foram realizadas duas provas de carga para cada condição, nestes gráficos está representada a média dos resultados.

Para quantificação do efeito de grupo, utilizou-se o seguinte procedimento: para uma mesma carga horizontal FH por estaca, exprime-se o deslocamento horizontal do grupo (y_g) como função do deslocamento horizontal da estaca isolada (y_1).

$$y_g = y_1 (1 + \alpha) \quad (5)$$

onde o coeficiente α representa o acréscimo de deslocamento horizontal por causa do efeito de grupo. Considerando-se $FH = 100$ N, obteve-se o gráfico do coeficiente α em função do espaçamento entre estacas. Para facilidade de comparação, a Fig. 5 apresenta os gráficos referentes aos três contentores.

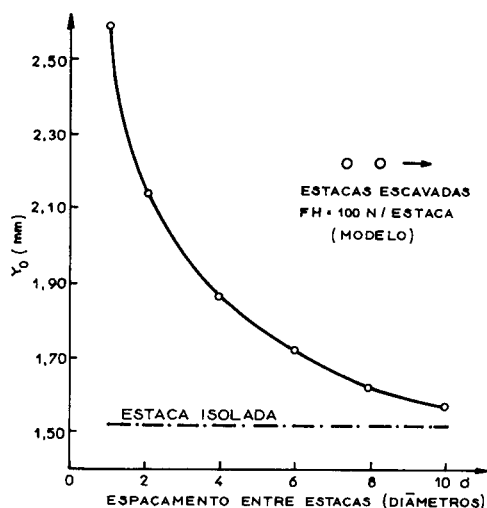


Fig. 2 — Deslocamento horizontal $\times$ espaçamento

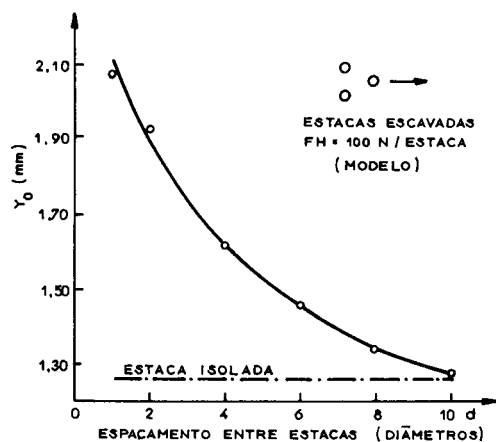


Fig. 3 — Deslocamento horizontal $\times$ espaçamento

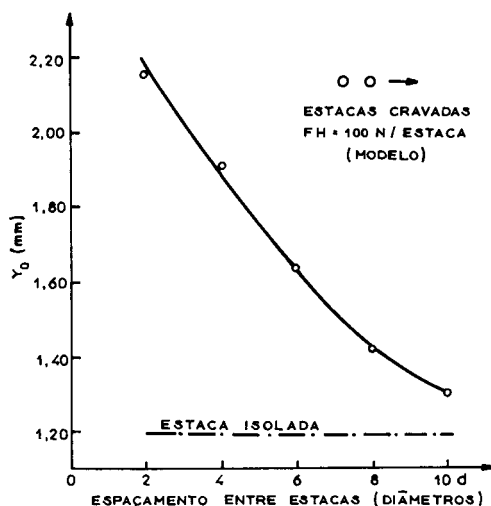


Fig. 4 — Deslocamento horizontal $\times$ espaçamento

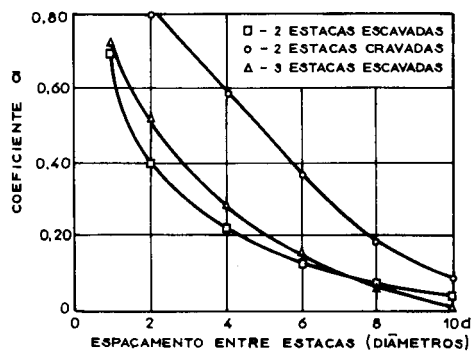


Fig. 5 — Efeito de grupo $\times$ espaçamento

Julgou-se interessante realizar também provas de carga sob gravidade normal (1g) em estacas isoladas, para comparação com os resultados obtidos a 40g. A Fig. 6, em coordenadas adimensionais, apresenta as curvas típicas de provas de carga em estacas isoladas a 1g e a 40g.

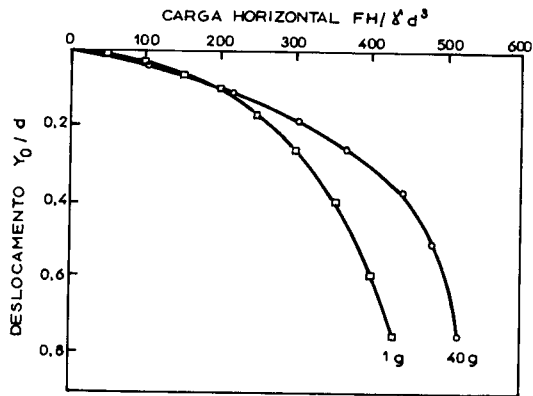


Fig. 6 — Curva da prova de carga em estaca isolada

Na construção desses gráficos, os resultados obtidos a 40g foram transformados para o correspondente protótipo, de acordo com as relações de escala apresentadas na Tabela 1a). Para conservar o mesmo protótipo, os ensaios realizados a 1g deveriam utilizar modelos de estacas em outro material, com um módulo de elasticidade 40 vezes menor, de acordo com as relações de escala da Tabela 1b), para modelos não centrifugados. Como tal substituição não foi feita, e os ensaios a 1g realizados sobre modelos do mesmo material, então os valores de carga lateral a 1g foram convertidos para compatibilizar a rigidez da estaca, validando assim os deslocamentos obtidos.

TABELA 1
Relações de Escalas em Modelos

Grandeza	Protótipo	a) Modelos centrifugados	b) Modelos não centrifugados
Aceleração	1	n	1
Área	1	1/n ²	1/n ²
Comprimento, diâmetro	1	1/n	1/n
Deformação específica	1	1	1
Deslocamento	1	1/n	1/n
Força	1	1/n ²	1/n ³
Massa	1	1/3	1/n ³
Massa específica	1	1	1
Módulo de Young	1	1	1/n
Momento de inércia	1	1/n ⁴	1/n ⁴
Peso específico	1	n	1
Tensão	1	1	1/n
Volume	1	1/n ³	1/n ³

8 — ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

A análise geral das Figs. 2 a 4 mostra que os deslocamentos de grupos de estacas carregadas horizontalmente são sempre superiores aos deslocamentos da estaca isolada, para uma mesma carga por estaca. Esta superioridade é mais acentuada nos grupos com pequenos espaçamentos, suaviza-se com o aumento dos espaçamentos e tende a anular-se a partir de espaçamentos da ordem de 8 a 10 diâmetros.

Na literatura geotécnica encontram-se diversas menções ao facto de que o efeito de grupo persiste até um espaçamento de vários diâmetros na direcção da carga horizontal. Segundo Broms (1972), por exemplo, “a acção do grupo deve ser considerada quando o espaçamento na direcção do carregamento é menor do que 6 a 8 diâmetros”.

Diferentes procedimentos de análise comprovam essa conclusão:

a) Análise Teórica: Poulos & Davis (1980).

Para o caso de $\beta = 0$, $L/D = 25$ e $K_R = 10^{-3}$, semelhante ao estudado pelos autores, o acréscimo de deslocamentos sofrido pelo grupo, em relação à estaca isolada, é de 75% para o espaçamento igual a um diâmetro e suaviza-se para maiores espaçamentos, chegando a 10% para dez diâmetros.

b) Ensaio em Verdadeira Grandeza: Brown et al. (1988).

Ensaçou-se um grupo de nove estacas com espaçamentos de três diâmetros. A areia era submersa, com compactidade relativa de 50%, e escavada para a implantação de estacas metálicas com diâmetro de 273 mm. Para uma carga de referência de 50 kN/estaca, encontra-se $\alpha = 0,56$, isto é, 56% de acréscimo no deslocamento horizontal do grupo em relação à estaca isolada nas mesmas condições.

Portanto, comparando-se esses resultados (apresentados na Fig. 7), com os obtidos pelos autores (Fig. 5), observa-se uma boa coerência.

A análise da Fig. 5 mostra que o efeito de grupo é mais acentuado no caso de estacas cravadas e que não há alteração significativa quando se passa de duas para três estacas escavadas.

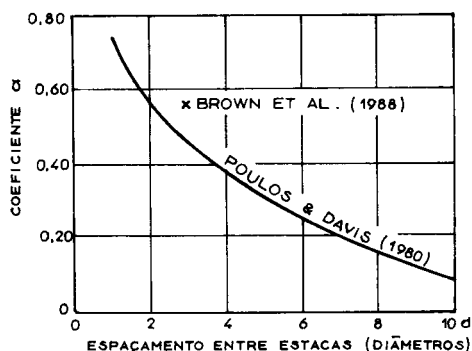


Fig. 7 — Efeito de grupo $\times$ espaçamento

A análise da Fig. 6 mostra que até deslocamentos da ordem de 10% do diâmetro há boa concordância entre as curvas das provas de carga realizadas a 1g e a 40g. Mas a partir de 10% a discordância é cada vez mais acentuada. Isto porque os ensaios a 1g aplicam baixos níveis de tensão, o que faz com que o comportamento do protótipo não seja bem reproduzido para níveis de tensão mais significativos.

9 — CONTINUIDADE DO PROGRAMA

Na continuidade desse programa de pesquisa do LCPC, estão previstos: instrumentação dos modelos, grupos maiores, carregamento vertical simultâneo e encastramento das estacas ao bloco. O objectivo final é a validação dos métodos actuais de dimensionamento, em particular no que se refere à previsão de deslocamentos e aos efeitos de grupo.

BIBLIOGRAFIA

- BROMS, B. B. — *Stability of Flexible Structures (Piles and Pile Groups)*, General Report, V European Conf. Soil Mech. Found. Eng., Madrid, Session III B, vol. 2, pp. 237-269. 1972.
- BROWN, D. A.; MORRISON, L. & REESE, L. C. — *Lateral Load Behavior of Pile Group in Sand*, *Journal of the Geotechnical Engineering*, ASCE, vol. 114, n.º 11, pp. 1261-1276. 1988.
- CINTRA, J. C. A. — *Modelos de Grupos de Estacas em Areia Submetidas a Carregamento Lateral em Centrifuga*. Relatório de estágio de Pós-Doutoramento, Centro de Nantes do LCPC, 66 pp. 1989.
- CORTÉ, J. F. — *Proc. of the Int. Conf. on Geotechnical Centrifuge Modelling*, Paris, A. A. Balkema, 610 pp. 1988.
- CORTÉ J. F. & GARNIER, J. — *Une Centrifugeuse pour la Recherche en Géotechnique*. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n.º 146, pp. 5-28. 1988.
- LEVACHER, D.; GARNIER, J.; BOUAFIA, A. & CINTRA, J. C. A. — *Étude Expérimentale de Pieux Sollicités Latéralement*, X European Conf. Soil Mech. Found. Eng., Florença, vol. II, pp. 463-466. 1991.
- MANDEL, J. — *Essais sur Modèles Réduits em Mécanique des Terrains: Étude des Conditions de Similitudes*. Revue de l'Industrie Minérale, vol. 44, n.º 9, pp. 1-10. 1962.
- PILOT, G. — *Centrifugation de Modèles Réduits d'Ouvrages en Terre et de Fondations*. Rapport de Recherche des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n.º 48, 44 pp. 1975.
- POKROVSKY, G. I. & FEDEROV, I. S. — *Studies of Soil Pressures and Soil Deformations by Means of a Centrifuge*. 1st Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Cambridge, USA, vol. 1, pp. 70. 1936.