

Vol 10 n: 3
dezembro, 1987

SOLOS E ROCHAS

revista brasileira de geotecnia

SYSNO	812396
PROD	001=SS
ABRYS CIRC	

PUBLICADA COM O APOIO CNPq - FINEP

nt. 812396

DISTRIBUIÇÃO DE CARGAS EM MODELOS DE GRUPOS DE ESTACAS CRAVADAS EM AREIA

LOAD DISTRIBUTION IN MODEL PILE GROUPS DRIVEN INTO SAND

José Carlos Angelo Cintra, D.Sc.
Prof. Assist., EESC-USP

José Henrique Albiero, D.Sc.
Prof. Assist., EESC-USP

Recebido em 29/03/88

RESUMO

Através de provas de carga realizadas em laboratório, analisa-se a distribuição de carga entre estacas em modelos instrumentados de grupos de estacas cravadas em areia. Utilizou-se areia seca, média a fina, medianamente compacta, e estacas metálicas instrumentadas e individualmente cravadas. Os ensaios foram realizados com diferentes configurações de grupos de estacas, variando-se, além do número (2 a 9), o espaçamento entre elas (2,0 a 3,5 vezes o diâmetro). Constatou-se que a distribuição de carga entre as estacas se altera com o nível de carregamento e é influenciada pela sequência de cravação e pela posição da estaca no grupo.

SUMMARY

By means of laboratory tests, the distribution of load among piles in instrumented model pile groups driven into sand is analysed. A medium to fine sand, medium dense, and steel piles instrumented and individually driven were used. The tests were carried out on various arrangements of pile groups, varying both the number of piles (2 to 9) and pile spacing (2.0 to 3.5 diameters). The results showed that the distribution of load among piles changes with the load level and that the distribution is influenced by the driving sequence and the position of the pile in the group.

1. INTRODUÇÃO

Para a realização das provas de cargas, construiu-se um sistema de reação metálico, no Laboratório de Mecânica dos Solos da EESC-USP, e adotou-se como tanque para a areia, um tubo de concreto com 0,80 m de diâmetro, 0,08 m de espessura e 1,00 m de altura.

Como solo-tipo da pesquisa, utilizou-se areia seca, média a fina, e mal graduada conforme mostra a curva granulométrica da Figura 1. Esta curva é semelhante às de Hanna (1963), Beredugo (1966),

Vesic (1967) e Tejchman (1973). Dos ensaios de massa específica dos sólidos e compactação relativa foram obtidos os seguintes parâmetros do solo-tipo:

$$\begin{aligned} \gamma_s &= 26,37 \text{ kN/m}^3 \\ \gamma_d \text{ max} &= 19,13 \text{ kN/m}^3 & e_{\text{min}} &= 0,38 \\ \gamma_d \text{ min} &= 15,19 \text{ kN/m}^3 & e_{\text{max}} &= 0,74 \end{aligned}$$

Não sendo objetivo da pesquisa variar a compactação da areia, adotou-se o valor médio dos pesos específicos obtidos em duas condições extremas: a areia colocada no tanque nas formas mais e menos compac-

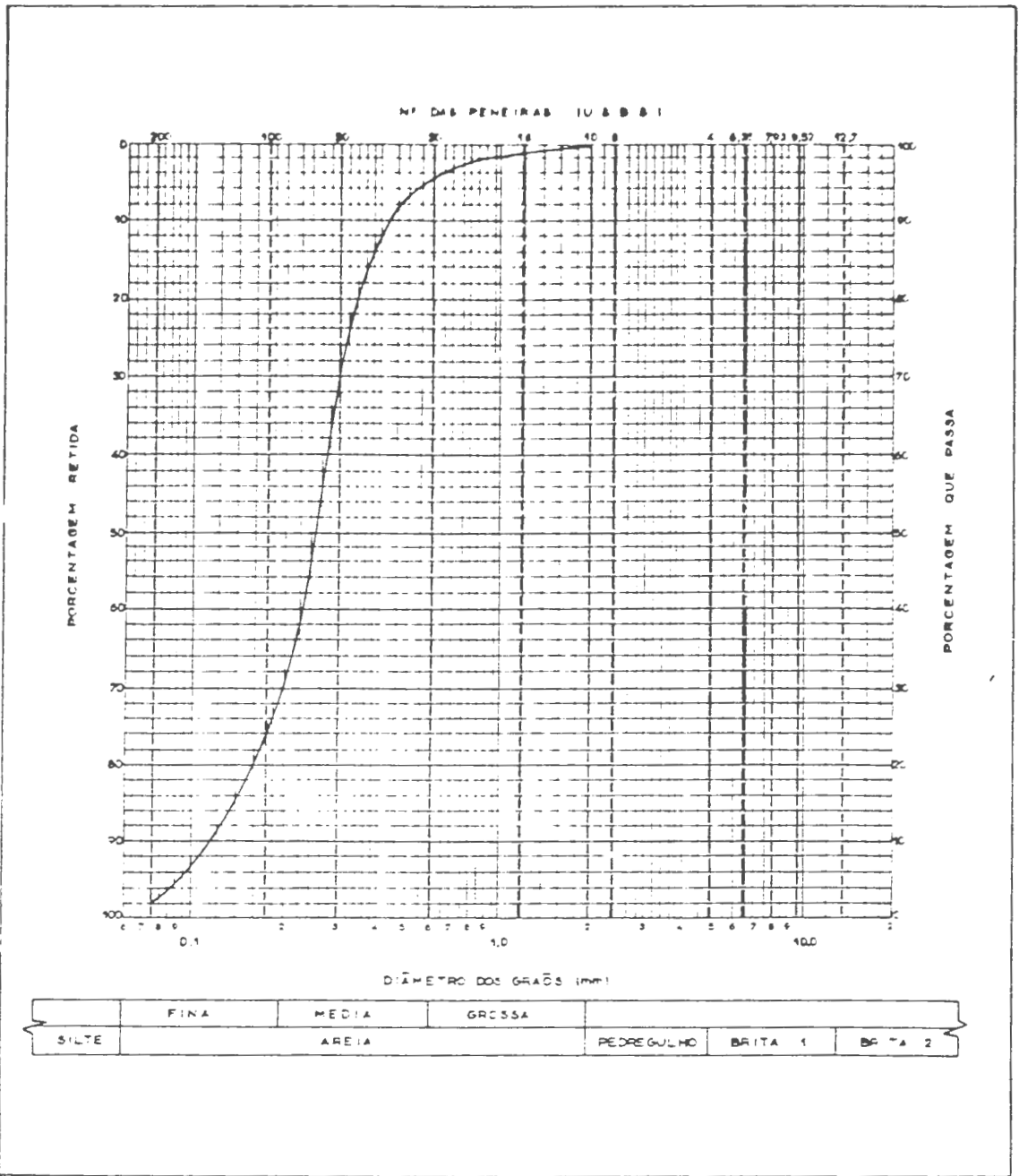


Fig. 1 — Curva granulométrica do solo — tipo da pesquisa.

tas possíveis. Disto resultou a fixação da compactação relativa em $D_r = 64\%$ (ou $\gamma_{med} = 17,46 \text{ kN m}^{-3}$). Nestas condições, o ensaio de cisalhamento direto rápido indicou $\phi = 33^\circ$.

Para se obter esta compactação relativa média toda vez que se enchesse o tanque, determinou-se a massa necessária de areia a ser colocada em dez camadas de 95 mm de espessura. Na formação de cada camada, a areia era despejada, nivelada e cuidadosamente

compactada com um soquete de madeira. Procedimento semelhante foi empregado por Hanna (1963), Beredugo (1966) e Tejchman (1973).

As estacas eram tubos metálicos com 1 mm de espessura, 650 mm de comprimento total, 570 mm para comprimento de cravação (l) e 38 mm de diâmetro externo (d), apresentando portanto $l/d = 15$. Este diâmetro atende à recomendação de Vesic (1965), para quem os modelos de fundações em solos arenosos devem ter

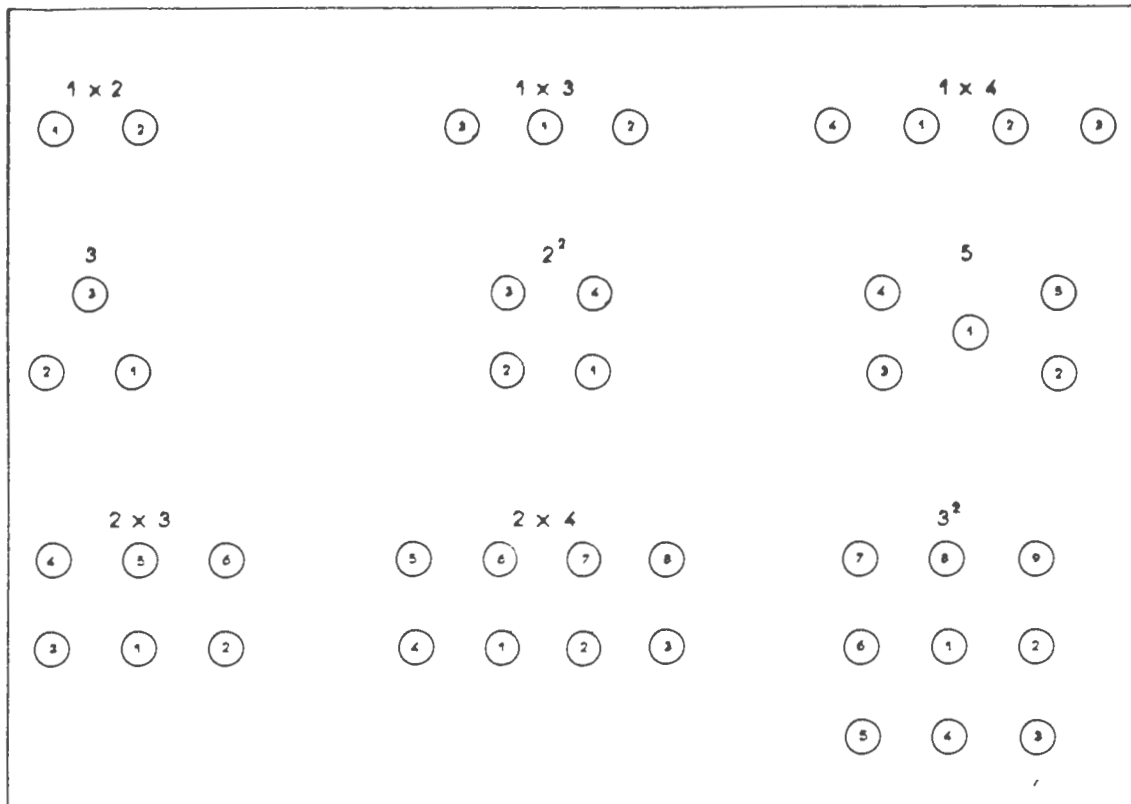


Fig. 2 — Configurações dos grupos ensaiados e as respectivas seqüências de cravação das estacas.

um diâmetro mínimo de 38 mm ou em torno do cone holandês para fornecer dados significativos, embora outros autores utilizem diâmetros menores de até cerca de 10 mm, como Hanna (1963) e Beredugo (1966). Quanto à relação l/d adotada, satisfaz às condições de Kézdi (1967), no mínimo 8 para haver efeito de estaca, e de Vesic (1967), no mínimo 15 para se atingir a mobilização completa da resistência lateral em estaca cravada em areia medianamente compacta.

Todas as estacas foram instrumentadas com extensômetros elétricos de resistência, colados em pares, na parede interna, em cinco níveis, visando a determinação da carga na ponta da estaca, ao nível da superfície do solo e em três níveis intermediários ao longo do fuste, em todos os estágios das provas de carga. Obviamente esta instrumentação tinha outras finalidades além das relatadas neste artigo.

As estacas foram fechadas na ponta, com ponteira metálica, e cravadas individualmente com macaco hidráulico, formando grupos com até nove estacas, sendo cada grupo ensaiado com quatro condições de espaçamento(s) entre estacas: 2,0-2,5-3,0 e 3,5 vezes o diâmetro da estaca, de centro-a-centro. Para posicionamento das várias estacas do grupo, utilizaram-se placas de madeira duratex de 3 mm de espessura, previamente furadas, servindo de gabarito de cravação. Na Figura 2, são mostradas as nove configurações estudadas bem como as respectivas seqüências de cravação.

Na cravação das estacas, uma a uma, com o mesmo comprimento, registrou-se a carga necessária para cravação de cada estaca, sendo observado que a carga de cravação, aumentava com a seqüência de cravação, chegando a atingir nos grupos maiores até além do dobro da carga de cravação da primeira estaca.

Após a cravação de todas as estacas de um determinado grupo, colocava-se um bloco de capeamento de forma piramidal, constituído de cinco peças de madeira sobrepostas, com altura de 52 mm cada.

Para a leitura com maior precisão da carga total aplicada ao grupo de estacas durante as provas de carga, utilizou-se uma célula de carga com capacidade para 50 kN, instrumentada com quatro extensômetros elétricos de resistência e devidamente calibrada.

Com a aplicação da carga em estágios, os grupos foram ensaiados até um recalque elevado, fixado em 9,5 mm ou 25% d , sendo a carga última (P_f) obtida pelo método de Van Der Veen (1953). Em cada estágio eram feitas as leituras de recalque, através de dois defletômetros diametralmente opostos, nos tempos de 0, 1, 2, 4, 8 e 15 min. A carga era repostada se necessário até 4 min; no intervalo de 4 a 8 min constatava-se sempre a estabilização completa dos recalques; e no intervalo de 8 a 15 min eram feitas as leituras da instrumentação através de aparelhos Transdutec (um Indicador de Deformação, modelo T832, e duas Caixas Seletoras, modelo CS-23T, com 23 canais cada).



Foto 1 — Vista geral

Na Foto 1 mostra-se uma vista geral de um grupo a ser ensaiado, vendo-se inclusive os equipamentos. Dados mais detalhados sobre a instrumentação (colagem dos extensômetros, circuitos de montagem, leituras obtidas, comportamento observado, etc.) e outros, encontram-se em Cintra (1987).

2. RESULTADOS OBTIDOS

Realizadas as provas de carga nos grupos de estacas, obteve-se, em cada estágio dos ensaios, a carga absorvida por estaca. Para representar estes valores, construiu-se para cada ensaio o gráfico de quinhão de carga, colocando-se em abscissas as cargas dos estágios de carregamento (como porcentagem da carga última do grupo) e em ordenadas a carga absorvida por estaca (como porcentagem da carga aplicada ao grupo). Desta forma, pode-se visualizar facilmente o desempenho comparado das várias estacas do grupo ao longo de todo o carregamento.

Nas Figuras 3 a 5, apresentam-se nove gráficos de quinhão de carga, sendo um de cada configuração, com diferentes escalas no eixo das ordenadas.

Para cada ensaio, elaborou-se também o gráfico carga x recalque por estaca, como exemplificado na Figura 6 (configuração 1 x 2, s/d = 2,0) e determinou-se pelo método de Van Der Veen (1953) a carga última para cada estaca do grupo. Para a prova de carga da Figura 6, apresenta-se na Tabela 1, para cada estágio do en-

Carga Total (% P_{U^0})	Carga na Estaca 1 (% P_{U^1})	Carga na Estaca 2 (% P_{U^2})
13,2	12,5	13,9
26,5	26,6	26,4
37,5	37,5	37,5
50,7	48,4	52,8
66,2	59,4	72,2
77,2	68,0	85,4
90,4	85,2	95,1
94,9	93,8	95,8
99,3	99,2	99,3

Tabela 1 — Carga absorvida por estaca (grupo 1 x 2, s/d, = 2,0)

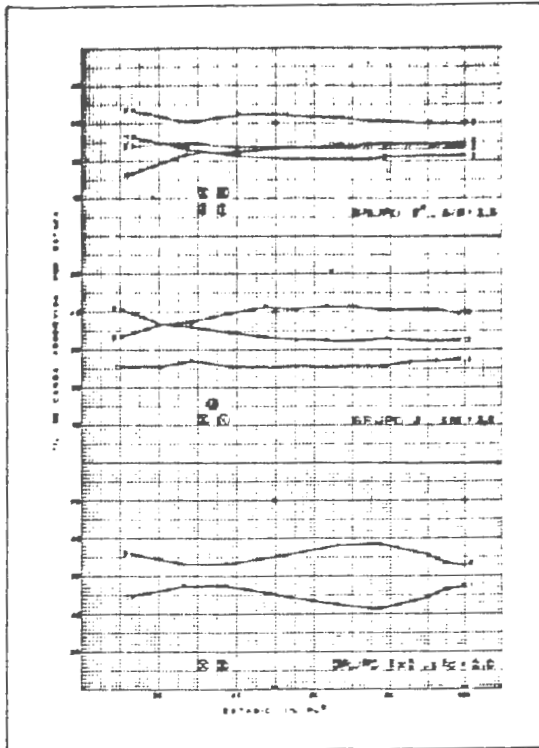


Fig. 3 — Gráficos de quinhão de carga.

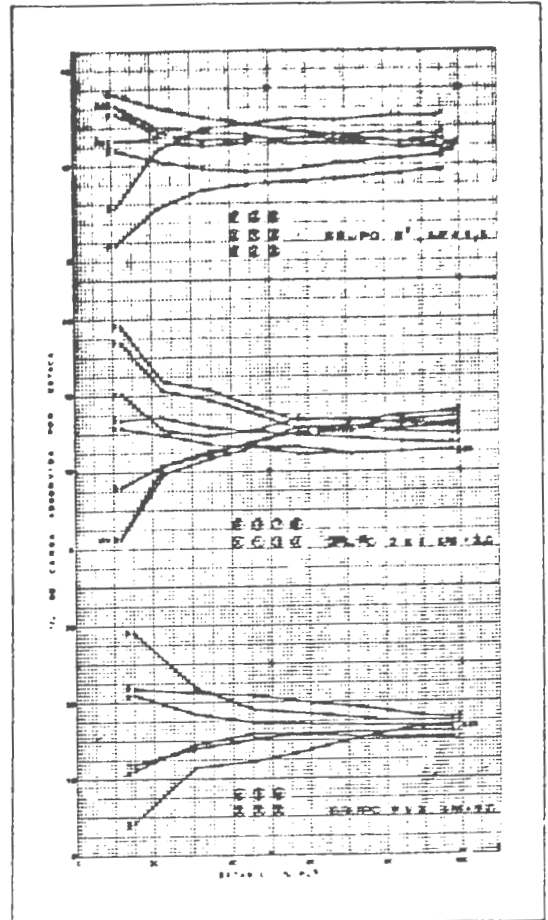


Fig. 5 — Gráficos de quinhão de carga.

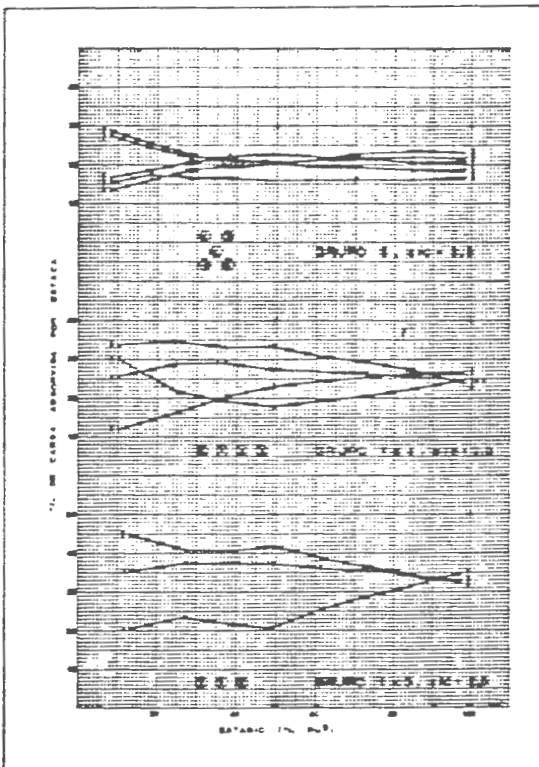


Fig. 4 — Gráficos de quinhão de carga.

saio, a porcentagem de carga absorvida por estaca em relação à sua própria carga última

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para os grupos em que todas as estacas estão em posições semelhantes em relação ao centr. de gravidade (configurações 1x2, 3 e 2'), observa-se na Figura 3 que:

- a) até cerca de 30% de carga última do grupo, há uma fase inicial de distribuição aleatória das cargas;
- b) de 30 a 80% da carga última do grupo, há uma fase intermediária de influência acentuada da seqüência de cravação, com as estacas cravadas por último recebendo maior parcela de carga (a última estaca cravada com cerca de 20% mais do que a média);
- c) de 80% em diante, há uma fase final em que ainda permanece a influência da seqüência de cravação, mas agora com uma tendência

para distribuição mais uniforme das cargas (para 99% de P_u , no grupo 1x2 com $s/d = 2,0$, a última estaca recebe apenas 6% mais do que a média). Esta tendência fica mais suave nos grupos com número maior de estacas.

Para os grupos em que há duas posições diferentes para as estacas (configurações 1x3, 1x4, 5, 2x3 e 2x4), observa-se nas Figuras 4 e 5 que:

- até cerca de 30 a 40% da carga última do grupo, há uma fase inicial de distribuição aleatória das cargas;
- em seguida, há uma fase intermediária de influência simultânea da seqüência de cravação (estacas cravadas por último recebendo maior parcela de carga) e da posição da estaca no grupo (estacas centrais recebendo maior parcela de carga), onde se destaca a mudança sensível de desempenho da primeira estaca cravada, principalmente quando ela é a única estaca central (configurações 1x3 e 5); e
- próximo da ruptura, há uma fase final, em que permanece a influência simultânea da seqüência de cravação e da posição da estaca, mas com uma tendência nítida para uma melhor redistribuição das cargas.

Para o único grupo em que há três diferentes posições para as estacas (configuração 3²), observa-se na Figura 5 que:

- até cerca de 30% da carga última do grupo, há uma fase inicial de distribuição das cargas;
- em seguida, passa a haver influência simultânea da seqüência de cravação e da posição da estaca, até próximo da ruptura, principalmente nas estacas de borda (2, 4, 6 e 8) e de canto (3, 5, 7 e 9). Neste caso, também se observa a mudança acentuada de desempenho da primeira estaca cravada

Assim, nos grupos em que há uma única estaca central (configurações 1x3, 5 e 3²), destaca-se ao longo do carregamento, o sensível aumento do quinhão de carga recebido por essa estaca, passando de cerca de 20 a 30% menos do que a média nos primeiros estágios, para 5 a 15% mais do que a média nos estágios finais.

Todos esses resultados concordam razoavelmente bem com os de Beredugo (1966), mas não são comparáveis aos de Vesic (1967), obtidos com cravação simultânea de todas as estacas do grupo.

A análise da Figura 6 mostra que a segunda estaca cravada apresenta carga última maior do que a pri-

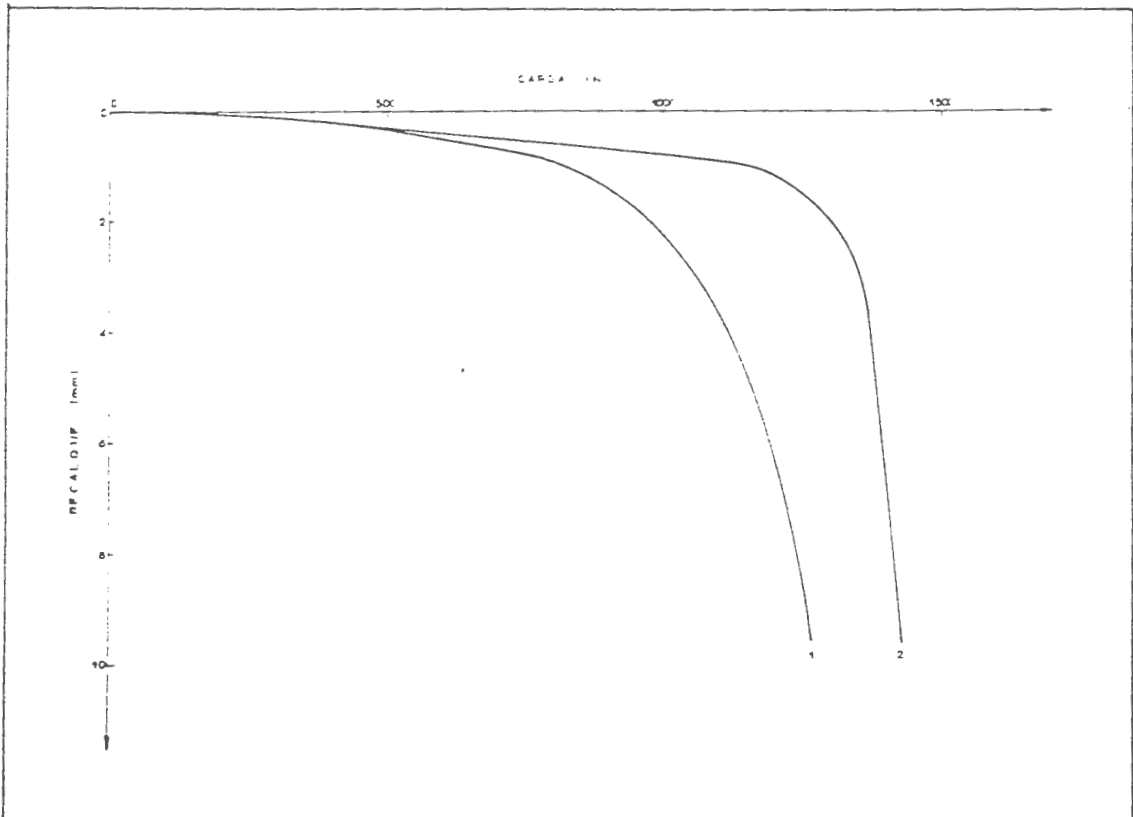


Fig. 6 — Curvas "carga x recalque" por estaca (grupo 1 x 2, $s/d = 2,0$)

meira. Por outro lado, vê-se na Tabela I que, com a sequência de estágios da prova de carga, a segunda estaca se aproxima muito mais depressa da ruptura, havendo uma redistribuição de cargas nos estágios finais, o que faz com que ambas as estacas no último estágio estejam à mesma distância da ruptura.

4. CONCLUSÕES

Nas condições da pesquisa efetuada pode-se concluir que a distribuição de carga entre as estacas de um grupo não é uniforme, varia com o nível de carregamento, e depende da posição da estaca no grupo e da sequência de cravação.

Ao longo do carregamento do grupo de estacas constata-se que há três fases distintas.

- a) até 30% da carga última do grupo, a distribuição de carga entre estacas é aleatória;
- b) entre 30 e 80% da carga última do grupo, a distribuição é influenciada simultaneamente pela posição da estaca no grupo (estacas centrais absorvem maior parcela de carga) e pela sequência de cravação (estacas cravadas por último absorvem maior parcela de carga);
- c) além de 80% da carga última do grupo, permanece a influência simultânea dos fatores posição da estaca e sequência de cravação, mas com tendência para redistribuição das cargas.

Resalte-se, finalmente, que as estacas de um grupo apresentam diferentes cargas últimas individuais e que, em estágios intermediários da prova de carga, as estacas estão a diferentes distâncias das próprias rupturas, o que entretanto se uniformiza no final do ensaio.

Obviamente estas conclusões não são diretamente aplicáveis a casos reais de grupos de estacas em areia, pois além das várias dificuldades na extrapolação de resultados obtidos em modelos geotécnicos, optou-se nesta pesquisa por cravar todas as estacas com mesmo comprimento, não importando a energia necessária, o que não acontece na prática de fundações.

5. AGRADECIMENTOS

À FAPESP pelo suporte financeiro à pesquisa e aos técnicos do Laboratório de Mecânica dos Solos da USP pela colaboração na realização dos ensaios.

6. REFERÊNCIAS

Beredugo, Y.O., 1966, An Experimental Study of the Load Distribution in Pile Groups in Sand, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. III, 3; pp. 145-66

Cintra, J.C.A., 1987, Comportamento de Modelos Instrumentados de Grupos de Estacas Cravadas em Areia, EESC-USP, Tese de Doutorado, 117 p.

Hanna, T.H., 1963, Model Studies of Foundations Groups in Sand, *Geotechnique*, Vol. 13, 4, pp. 334-51

Kézdi, A., 1957, Bearing Capacity of Piles and Pile Groups, *IV Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.*, London, 2, pp. 46-51

Tejchman, 1973, Model Investigations of Pile Groups in Sand, *Journal of Soil Mech. and Found. Div., ASCE*, Vol. 99, SM 2, pp. 199-217

Van der Veen, 1953, The Bearing Capacity of Pile, *III Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.*, Zurich, 2, pp. 84-90

Vesic, A.S., 1965, Ultimate Loads and Settlements of Deep Foundations in Sand, *Proc. of Symposium on Bearing Capacity and Settlements of Foundations*, Duke University, North Carolina, pp. 53-68

Vesic, A.S., 1967, A Study of Bearing Capacity of Deep Foundations, Final Report, Project B-189, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, 263 p.

Vesic, A.S., 1977, Problems of Development of a Mathematical Model Pile to Predict Performance of a Pile Group, *Federal Highway Administration Research Review Conference*, Atlanta, Georgia, 28 p.

