

**60º CBGE**  
**IX COBRAMSEF**

**4 A 9 NOV 1990**

**v.2, tema 8, pp.333-339**

**S.Paulo, ABGE/ABMS, 1990**

<b>SYSNO</b>	809894
<b>PROD</b>	001750
<b>ACERVO EESC</b>	

st. 809894

**ABGE**

**AB  
MS**

**SALVADOR**

# CARREGAMENTO LATERAL EM MODELOS DE GRUPOS DE ESTACAS EM CENTRÍFUGA

CINTRA, José Carlos A.

Prof. Doutor, EESC-USP

LEVACHER, D

Doutor Ing., Univ. du Havre - França

GARNIER, J

Ph.D, LCPC - França

## RESUMO

O comportamento de um grupo de estacas solicitadas lateralmente torna-se complexo pelo caráter tridimensional do problema, a não linearidade da interação solo-estrutura e o efeito de grupo. Daí a necessidade da realização de experimentos 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 (1 g), não reproduzem em geotecnia o mesmo comportamento tensão-deformação dos modelos do protótipo. A solução já consagrada mundialmente é a centrifugação dos modelos (ensaios realizados a  $n$  g em modelos reduzidos à escala 1/n), o que reproduz os mesmos níveis de tensão do protótipo.

Um programa experimental foi implantado na centrífuga do LCPC, França, cuja fase preliminar é aqui tratada. Trata-se de um estudo paramétrico de grupos de 2 a 3 estacas, escavadas e cravadas, com espaçamentos variando de 1 a 10 vezes o diâmetro. As estacas são metálicas, com 8 mm de diâmetro, que centrifugadas a 40 g correspondem a um protótipo de 0,32 m de diâmetro.

Apresentam-se os detalhes de modelação e das provas de carga realizadas, e discutem-se os resultados referentes ao efeito de grupo em função do espaçamento entre estacas.

## 1. INTRODUÇÃO

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

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

- a) As experiências realizadas sob gravidade normal não permitem satisfazer as condições de semelhança entre modelo e protótipo;
- 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, atualmente se constituem 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 assertiva (Corté, 1988).

## 2. PRINCÍPIO DOS ENSAIOS POR CENTRIFUGAÇÃO

Para se observar o mesmo comportamento sobre um protótipo e 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, se utiliza o conceito de "escala" de uma grandeza física. Deste modo, define-se  $\sigma^*$  a escala de tensões, ou seja, a relação entre a tensão no protótipo e no modelo,  $\sigma^* = \sigma_p/\sigma_m$ , e de maneira análoga,  $\rho^*$  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:

$$\sigma^* = \rho^* g^* l^*$$

Em mecânica dos fluidos, por exemplo, as experiências são frequentemente realizadas nas condições ambientes ( $g^* = 1$ ), mas os materiais do protótipo são substituídos no modelo reduzido por outros materiais 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 x deformação, eventualmente desconhecidas, é necessário que:

$$g^* l^* = 1$$

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 - (100g).

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

$$\sigma^* \approx l^*$$

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  $c_u = 1$  kN/m<sup>2</sup> o número de estabilidade à ruptura

$$c_u / \gamma H = 0,19$$

implica  $\gamma = 405$  kN/m<sup>2</sup>, o que corresponde a uma aceleração de 20 g, considerando-se o peso específico da argila 20 kN/m<sup>3</sup>.

### 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 centrífuga americana, de porte bem pequeno (raio de 0,20 m), foi utilizada por Bucky na Universidade de Colúmbia, no estudo de estabilidade de tetos de minas. Esta atividade em mecânica das rochas não teve, porém, grande repercussão e somente a partir dos anos 70 a modelização em centrífuga conheceu um real desenvolvimento nos EUA.

Ao contrário, as experiências pioneiras em centrífuga realizadas em Moscou, por Davidenkov e Pokrovsky, se desenvolveram rapidamente. Os resultados obtidos em modelos reduzidos centrifugados foram logo utilizados em projetos de barragens, aterros e diques. Em artigo apresentado ao 12º Congresso Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, em 1936, Pokrovsky e Fedorov mostraram o esquema de uma centrífuga, registraram 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, condutos enterrados, e recalques de fundações. Nos 30 anos seguintes, foram instaladas diversas outras centrífugas 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 os anos 60, quando foram feitas traduções na Inglaterra (Schofield, 1980).

Ainda na década de 60, surgiram as primeiras centrífugas 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 centrífuga do LCPC-Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, na França, de concepção mais elaborada que as precedentes e de maior capacidade. Inaugurada em 1985, a centrífuga do LCPC tem um raio de 5,50 m, pode ser submetida a uma aceleração máxima de 200 g, e ensaiar modelos de até 20 kN (Corté et al, 1986).

Ressalta-se finalmente, a evolução na complexidade das experiências, graças aos avanços recentes na instrumentação e na eletrônica. As primeiras experiências se limitavam 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. Atualmente, pode-se intervir sobre o modelo

durante a centrifugação, como por exemplo, realizar provas de carga em fundações.

#### 4. PROGRAMA DE PESQUISA

Na centrifuga do LCPC, está em andamento um amplo programa de ensaios em grupos de estacas carregadas lateralmente, cuja fase preliminar é apresentada neste artigo (Cintra, 1989).

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



Fig. 1 - CONFIGURAÇÃO E DIREÇÃO DE CARREGAMENTO

As estacas eram 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  $13,57 \text{ kN/m}^3$  e  $16,55 \text{ kN/m}^3$  respectivamente. Adotou-se a compactidade relativa de 70% ( $\gamma = 15,60 \text{ kN/m}^3$ ), a qual é obtida na constituição do maciço pelo método da "chuva de areia". Nesta compactidade a areia apresenta um ângulo de atrito interno de  $34^\circ$ .

Para cada bateria de ensaios o maciço de areia era preparado em um container retangular de dimensões internas 0,80 m x 1,20 m e altura 0,36 m. As estacas eram implantadas no container 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 container, com a utilização de fio de pesca e clips (varal), formando os diferentes grupos com os espaçamentos desejados. Em seguida a areia era despejada pelo método da chuva de areia, constituindo o maciço até a 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 um guia, uma haste e um martelo de massa igual à da estaca (50 gramas), caindo em queda livre de uma altura de 10 cm. Saliente-se que se o objetivo 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 containers as estacas apresentavam uma ficha de 200 mm e suas pontas ficavam a 65 mm do fundo do container. O controle de compactidade era verificado através de cápsulas colocadas no interior do maciço.

#### 6. PROVAS DE CARGA

Embarcado o container na centrifuga, realizavam-se as provas de carga a 40 g. 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 (estacas isoladas), 40 N (grupo de duas estacas) ou 60 N (grupo de três estacas), e conduzidas até a ruptura ou um deslocamento excessivo. Em cada estágio a carga era mantida durante 1 min e os deslocamentos laterais eram obtidos por meio de medidores instalados à superfície do solo.

#### 7. RESULTADOS OBTIDOS

Realizado o conjunto de provas de carga de um mesmo container, adotou-se o seguinte procedimento na construção do gráfico de efeito de grupo: para uma dada carga lateral por estaca,  $FH = 100 \text{ N}$ , obteve-se para cada grupo o deslocamento lateral ao nível do solo,  $Y_0$ , encontrando-se a variação de  $Y_0$  em função do espaçamento entre estacas. Nas Figuras 2 a 4 são apresentados estes gráficos de efeito de grupo para os três containers 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 lateral FH por estaca, exprime-se o deslocamento lateral do grupo ( $Y_g$ ) como função do deslocamento lateral da estaca isolada ( $Y_1$ )

$$Y_g = Y_1 (1 + \alpha)$$

onde o coeficiente  $\alpha$  representa o acréscimo de deslocamento lateral pelo efeito de grupo. Considerando-se FH = 100 N, obteve-se o gráfico do coeficiente  $\alpha$  em função do espaçamento entre estacas.

Para facilidade de comparação, a Figura 5 apresenta os gráficos referentes aos três containers.

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

Na construção desses gráficos, os resultados obtidos a 40 g 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 1 g 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 1 g realizados sobre modelos de mesmo material, então os valores de carga lateral a 1 g foram divididos pela raiz quadrada de 40, para compatibilizar a rigidez da estaca, validando assim os deslocamentos obtidos.

## 8. ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

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

A análise da Figura 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.

A análise da Figura 6 mostra que até deslocamentos da ordem de 10% do diâmetro há boa concordância entre as curvas das provas de carga realizadas a 1 g e a 40 g. Mas a partir de 10% a discordância é cada vez mais acentuada. Isto porque os ensaios a 1 g 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, engastamento das estacas ao bloco. O objetivo final é a validação dos métodos atuais de dimensionamento, em particular no que se refere à previsão de deslocamentos e os efeitos de grupo.

## 10. BIBLIOGRAFIA

CINTRA, J.C.A. (1989) - Modelos de Grupos de Estacas em Areia Submetidas a Carregamento Lateral em Centrifuga. Relatório de Estágio de Pós-Doutoramento, Centro de Nantes do LCPC, 66p.

CORTÉ, J.F. (1988) - Proc. of the Int. Conf. on Geotechnical Centrifuge Modelling, Paris, A.A. Balkema, 610p.

CORTÉ, J.F. & GARNIER, J. (1986) - Une Centrifugeuse pour la Recherche en Geotechnique. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 146, p. 5-28.

MANDEL, J. (1962) - Essais sur Modèles Réduits en Mécanique des Terrains: Étude des Conditions de Similitudes. Revue de l'Industrie Minière, vol. 44, n° 9, p. 1-10.

PILOT, G. (1975) - Centrifugation de Modèles Réduits d'Ouvrages en Terre et de Foundations, Rapport de Recherche des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 48, 44p.

POKROVSKY, G.I. & FEDOROV, I.S. (1936) - Studies of Soil Pressures and Soil Deformations by Means of a Centrifuge. 1<sup>st</sup> Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Cambridge, USA, vol. 1, p. 70.

Tabela 1 - Relações de Escalas em Modelos

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

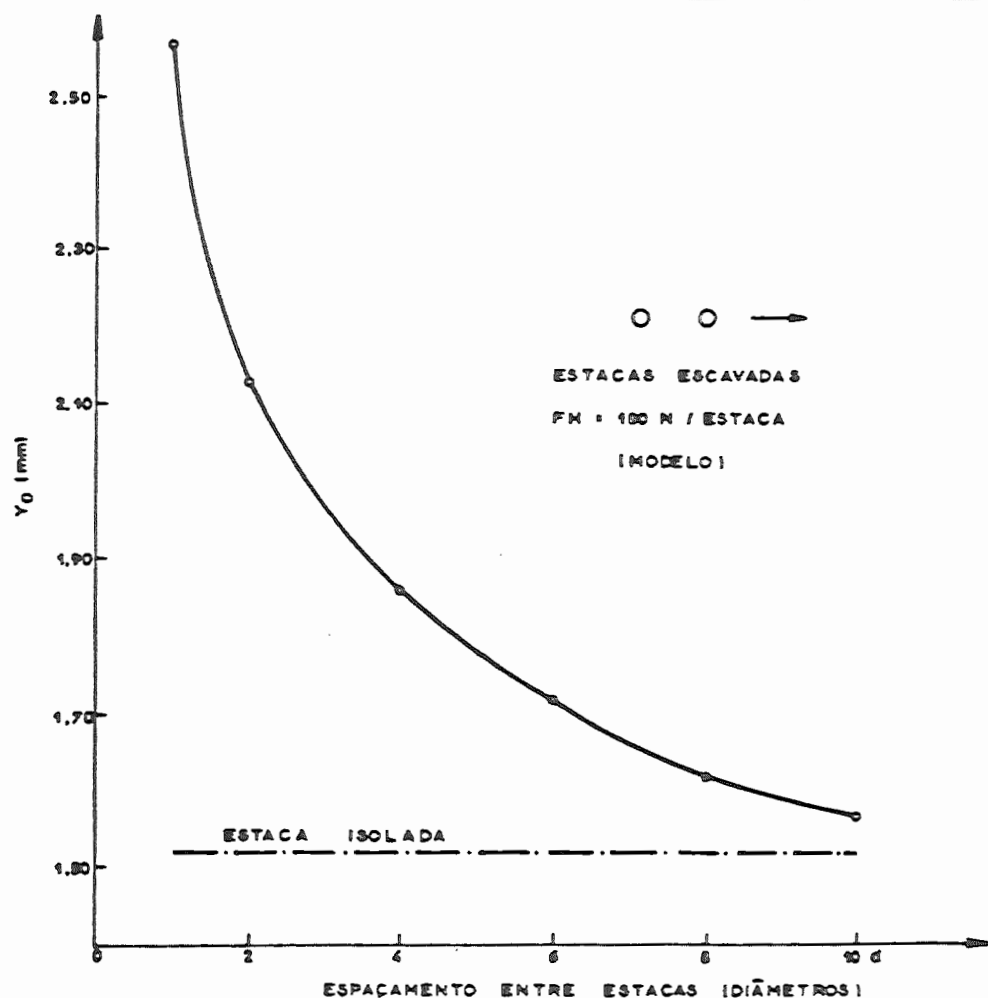
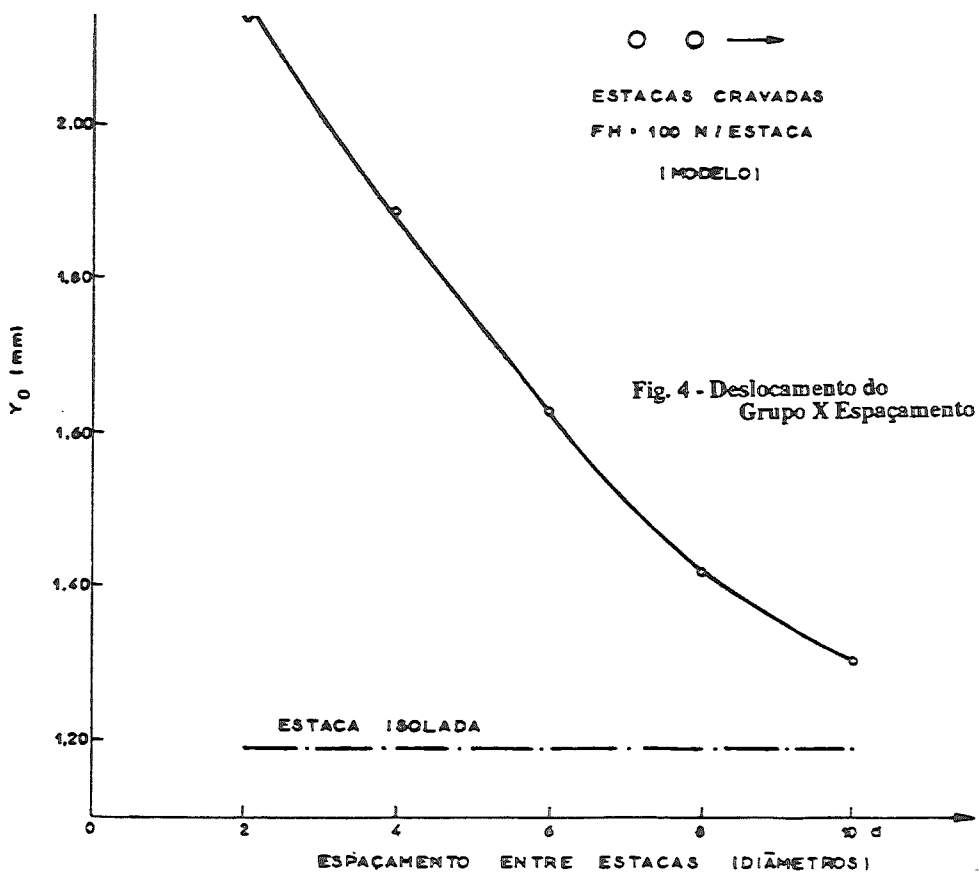
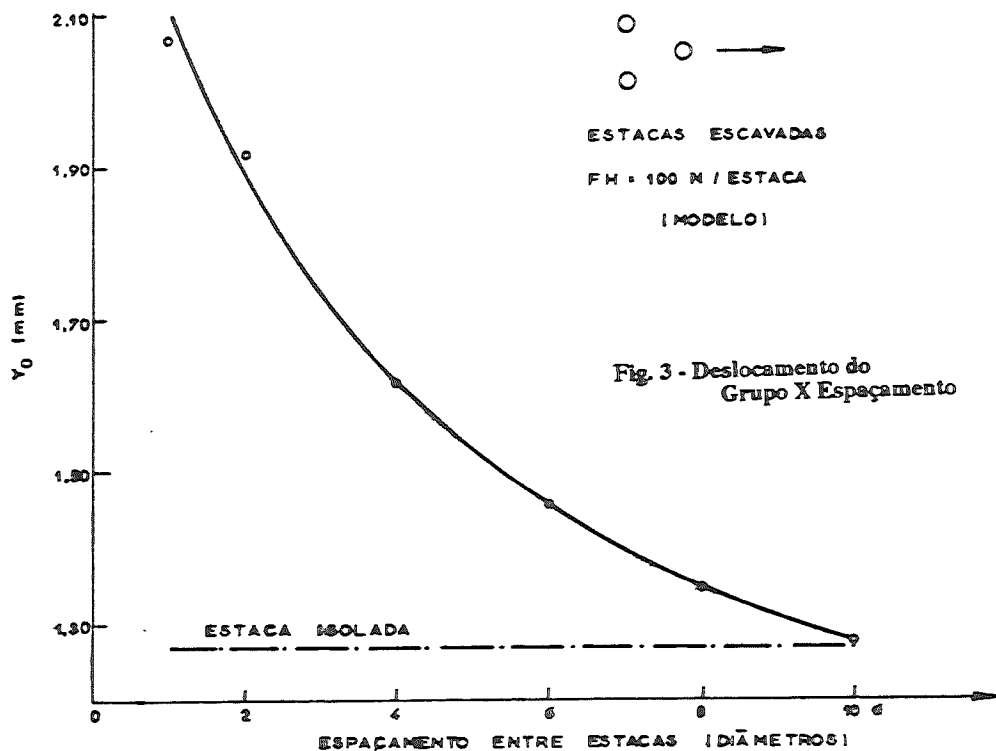


Fig. 2 - DESLOCAMENTO DO GRUPO X ESPAÇAMENTO



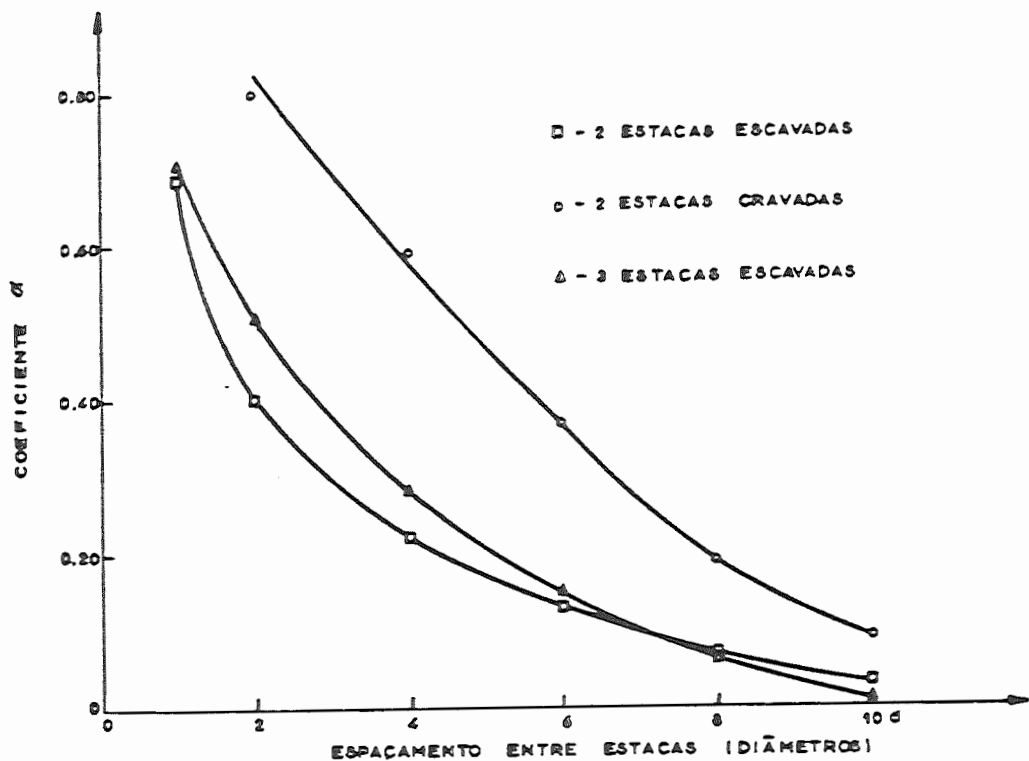


Fig. 5 - EFEITO DE GRUPO x ESPAÇAMENTO

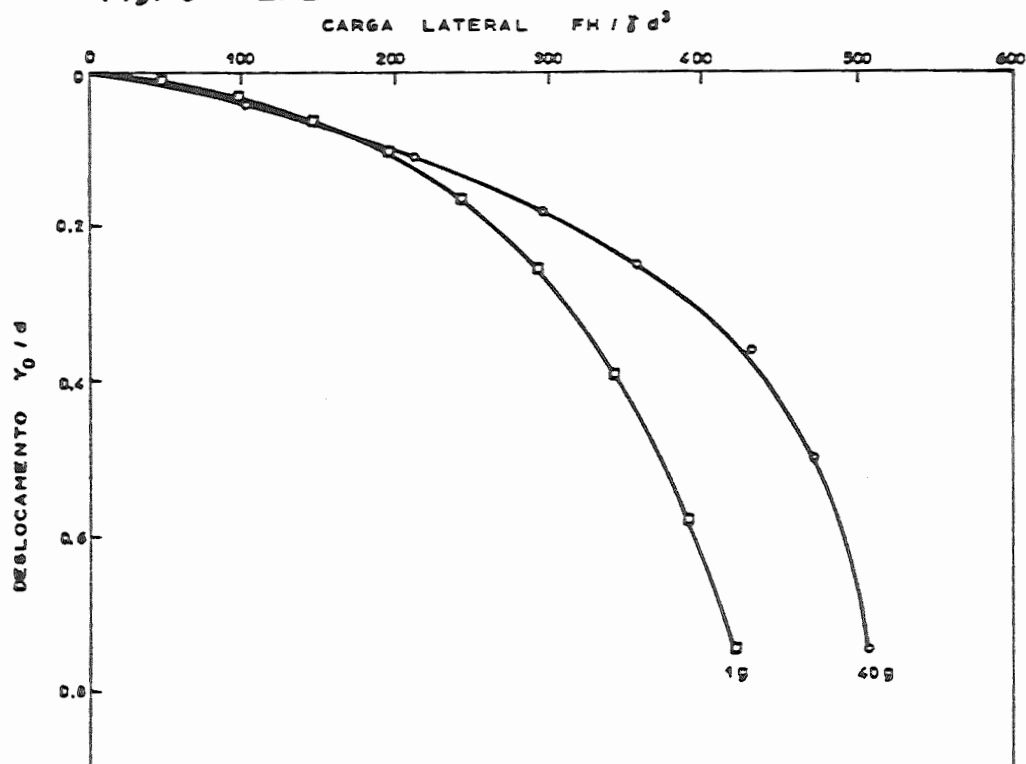


Fig. 6 - CURVA DA PROVA DE CARGA EM ESTACA ISOLADA