

## PROVAS DE CARGA HORIZONTAIS EM ESTACAS PRÉ-MOLDADAS DE CONCRETO CRAVADAS EM SOLO DE ALTA POROSIDADE

LATERAL LOAD TEST IN PRECAST-CONCRETE PILES DRIVEN IN A HIGH POROSITY SAND SOIL

Stélio Maia Menezes, David de Carvalho e Paulo José Rocha de Albuquerque

Universidade Federal de Lavras  
Departamento de Engenharia  
Caixa Postal 3037 37.200-000  
Lavras, MG Brasil  
E-mail: stelio@ufla.br

### ABSTRACT

Colluvial collapsible sand porous soils, occur in west center region of Brazil, representing about 5% of the area of whole country. These porous colluvial soils reach, in many places, the thickness of 15 meters, being common values about 8 meters. Precast-concrete piles were building and made especially to that research. The piles were drive in sand soil with high porosity and collapsible characteristics, in the city of Ilha Solteira (SP). Vertical static load tests ("slow") were made in three piles with horizontal loading tests, with the objetive analyze the reaction of soil to the horizontal load with ground in the conditions natural, inundation and compacted (near to the head of the pile). The average value of the coefficient of horizontal reaction of the soil ( $\eta_H$ ), for understood intervals of displacement between 6,0 and 12,0 mm, was of 1313 kN/m<sup>3</sup>.

### RESUMO

Solos porosos arenosos colapsíveis coluvionares ocorrem na região centro-oeste do Brasil, representando aproximadamente 5% da área do país. Esses coluviões porosos alcançam, em muitos locais, espessuras de até 15 metros, sendo comuns valores de 8 metros. Nesta pesquisa, foram confeccionadas diversas estacas pré-moldadas de concreto especialmente para este trabalho. Essas estacas foram cravadas em solo arenoso de alta porosidade colapsível, da cidade de Ilha Solteira (SP). Provas de carga axiais estáticas ("lentas") foram efetuadas em três estacas com carregamento horizontal, objetivando analisar a reação do solo aos esforços horizontais com o terreno nas condições natural, inundado e compactado (próximo à cabeça da estaca). O valor médio do coeficiente de reação horizontal do solo ( $\eta_H$ ), para intervalos de deslocamento compreendidos entre 6,0 e 12,0 mm, foi de 1313 kN/m<sup>3</sup>.

**Palavras-Chave:** estacas, provas de carga, solos porosos.

## 1 – INTRODUÇÃO

As fundações por estacas podem estar sujeitas a elevadas cargas horizontais. São provenientes de diversas causas: as solicitações por empuxo e os ventos são os casos mais citados na literatura. Os deslocamentos da estaca e, os diagramas de momento fletor e esforço cortante, devidos à ação das cargas laterais, são determinados levando-se em conta a reação horizontal do solo, cuja análise deriva da solução do problema da viga sobre apoio elástico. O comportamento do solo é simulado por um conjunto de molas igualmente espaçadas, cada uma delas independente das outras. Considera-se que, a reação seja proporcional ao deslocamento do ponto, seja na superfície - no topo da estaca - ou em profundidade.

Diferentes maneiras existem para calcular as tensões de contato estaca-solo, os deslocamentos e os momentos fletores nas estacas. A mais usual é a modelagem de Winkler. Uma segunda, consiste em aplicar o método dos elementos finitos que representa de maneira bastante aproximada o comportamento do solo e da estaca. E, por último, a utilização da teoria da elasticidade, formulada por Poulos e Davis (1974).

## 2 – MÓDULO E COEFICIENTE DE REAÇÃO HORIZONTAL DO SOLO

O método da representação de Winkler é baseado nas hipóteses arbitrárias e incorretas em que o deslocamento ( $y$ ) de um elemento de uma área carregada é independente da carga nos elementos adjacentes. Esse deslocamento é proporcional à pressão de contato ( $p$ ), sendo:

$$\frac{p}{y} = K_H \quad (1)$$

$K_H$  = módulo de reação horizontal do solo.

Esse método, com suas deficiências teóricas é, no entanto, universalmente usado para estudar os deslocamentos horizontais de estacas, inclusive não considerando o valor de  $K_H$  constante. O valor de  $K_H$  e sua variação com a profundidade dependem das características de deformabilidade do solo. Para solos argilosos pré-adensados, em que o módulo de deformabilidade é independente da profundidade, admite-se  $K_H$  constante. Nos casos de areias puras, o valor de  $K_H$  cresce de forma linear com a profundidade.

O coeficiente de reação horizontal do solo é definido como a relação entre a tensão horizontal e o respectivo deslocamento do solo, válida para casos de estacas carregadas lateralmente.

$$\eta_H = \frac{\text{pressão}}{\text{deslocamento}} \quad (2)$$

### 3 – DESLOCAMENTO DA ESTACA NA SUPERFÍCIE

Para estudar o comportamento de uma fundação há necessidade de se prever a variação de  $K_H$  com a profundidade do solo. As estacas, por exemplo, quando submetidas a carregamentos horizontais, sofrem deslocamentos em todo o seu comprimento.

Kimura (1993) apresenta, para estaca longa ou flexível com topo livre, resultados de provas de carga horizontais realizadas em solos arenosos. Na Figura 1, observa-se a distribuição do deslocamento horizontal, para um dado carregamento, em função da profundidade do solo (curva carga *versus* deslocamento em profundidade).

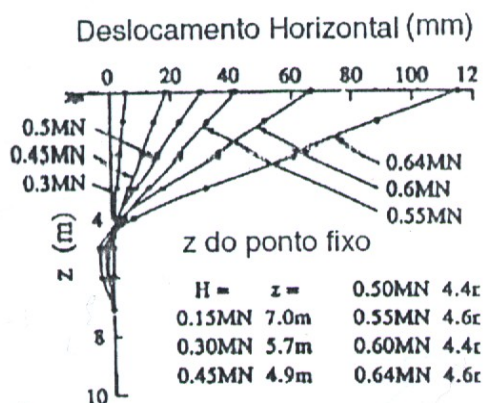


Figura 1. Deslocamento horizontal *versus* profundidade

Na maioria dos casos, medem-se somente os deslocamentos no topo da estaca e, calcula-se o valor de  $K_H$  assumindo uma distribuição apropriada em profundidade. A determinação do módulo de reação horizontal do solo é usualmente obtida por meio de provas de carga horizontais em estacas.

O módulo de reação horizontal do solo está relacionado com a compressibilidade do solo, com o nível de deslocamento alcançado pela estaca e, com o diâmetro da estaca. É usado para simular o comportamento do solo com molas, para calcular estruturas com peças enterradas. Além das provas de carga horizontais, existe um outro ensaio que simula o fenômeno do deslocamento horizontal da estaca. Trata-se do ensaio pressiométrico, do qual se obtém a curva “p *versus* y”.

#### 3.1 Método de Matlock e Reese (1961)

Dentre os inúmeros métodos existentes para a determinação da reação horizontal do solo, a solução de Matlock e Reese (1961), em que as deformações são proporcionais à profundidade ( $K_H = \eta_H \cdot z$ ), é bastante

utilizada nos estudos de solos arenosos e argilas normalmente adensadas.

Os autores estudaram soluções numéricas que permitem qualquer variação do diagrama de reação do solo. Seu estudo é aplicado para casos de estacas longas, com carregamento no topo livre, por força horizontal e do momento fletor, considerando a não-linearidade do comportamento do solo. Esse método não permite a variação da rigidez flexional da estaca.

Para a obtenção de  $\eta_H$ , em provas de carga horizontais, realizadas em solos arenosos, Alizadeh & Davisson (1970) utilizam a seguinte expressão:

$$\eta_H = \frac{4,42 \cdot H^{5/3}}{Y_0^{5/3} (E_E \cdot I)^{2/3}} \quad (3)$$

H = carga aplicada no topo da estaca ;  
 $Y_0$  = deslocamento na superfície do solo ;  
 $E_E$  = módulo de elasticidade da estaca ;  
 I = momento de inércia da estaca.

#### 3.2 Aspectos das curvas ( $y_0$ *versus* $\eta_H$ e $h$ *versus* $y_0$ )

Miguel (1996) apresenta, diversos gráficos, deslocamento na superfície do solo *versus* coeficiente de reação horizontal, definindo um intervalo de valores para  $Y_0$  (entre 6,0 e 12,0 mm). Alizadeh & Davisson (1970) estimaram uma faixa compreendendo de 6,4 a 2,7 mm, enquanto Cintra (1981), estimou valores de 4,0 a 8,0 mm.

No mesmo trabalho, Miguel (1996) apresenta resultados de diversas curvas, H *versus*  $Y_0$ , obtidas em provas de carga horizontais, executadas em solos arenosos colapsíveis. A autora realizou ensaios em quatro tipos de estacas (raiz, apiloada, escavada e Strauss) - em diferentes umidades do solo: pré-inundado e em seu teor natural. Essas curvas apresentaram-se com valores de  $Y_0$  bastante dispersos, para iguais intervalos de carregamentos transversais (de até 20 kN) - aplicados no topo da estaca.

### 4 – METODOLOGIA USADA NA PESQUISA

Provas de carga horizontais, em estacas pré-moldadas de concreto, foram realizadas nesta pesquisa. Estas estacas possuem seção transversal quadrada (0,17m) e comprimento de 13m (Menezes, 1997).

#### 4.1 Instrumentação instalada nas estacas

A instrumentação nas estacas foi constituída por sensores instalados em oito níveis de profundidade, os quais mediram a sua inclinação - devida à aplicação de cargas transversais em seu topo. Esses sensores, inseridos no interior das bainhas, foram posteriormente recuperados - após o ensaio - e, utilizados nas demais estacas. A monitoração automática e contínua de inclinações em profundidade da estaca foi obtida através do sistema de mini-inclinômetro ou sistema Clipper. Esse aparelho consta de uma série de medidores de rotação instalados permanentemente, possuindo sensores de nível líquido

(Figura 2). Com isso, obtém-se a medição acurada de rotação em dois eixos perpendiculares. Para a medida de deslocamentos ao longo do fuste da estaca, os sensores foram posicionados em cotas pré-determinadas, distanciadas de um comprimento “L”. Assim, ao ocorrer uma rotação  $\theta$ , os eletrodos mergulham ou saem do líquido eletrolítico (Figura 3) e a sua resistência se altera proporcionalmente à rotação sofrida. Os deslocamentos são obtidos por integração e a medição é contínua, realizada por um sistema de aquisição de dados.

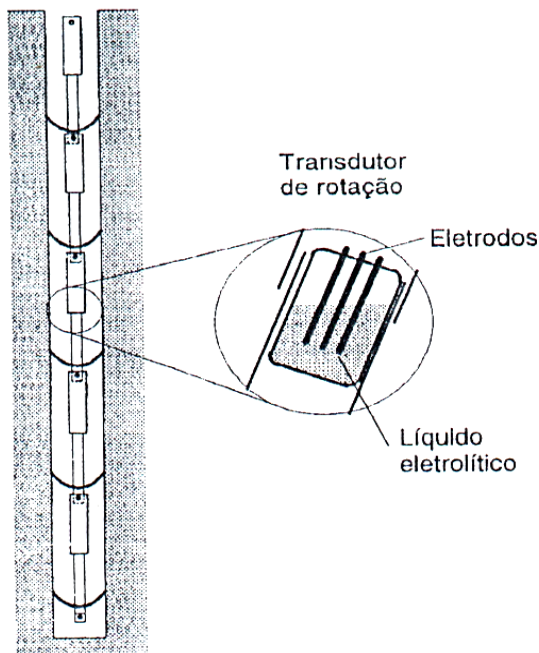


Figura 2. Medidores de rotação do mini-inclinômetro

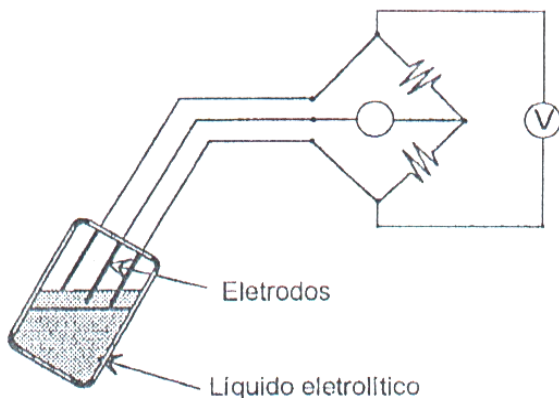


Figura 3. Líquido eletrolítico no mini-inclinômetro

#### 4.2 Ensaios realizados

Para a realização dos ensaios utilizou-se de: uma viga metálica (perfil “I”), um macaco hidráulico (com capacidade de 1,0 MPa), uma célula de carga para 50 kN, dois extensômetros com precisão de 0,01 mm, um

indicador de deformações (T-832), uma caixa de medição dos mini-inclinômetros e um sistema de sensores de nível líquido. Os dois extensômetros foram instalados nas faces laterais do bloco de coroamento (situados próximo à base do bloco – ao nível do terreno).

As provas de carga horizontais foram do tipo “lenta” (SML), observando-se os procedimentos da MB-3472/91. A aplicação das cargas foi efetuada próxima a base do bloco - ao nível do terreno, mesmo nível dos extensômetros.

Os ensaios foram efetuados em três estacas (“A”, “B” e “C”). Aplicaram-se incrementos de carga de 0,5 kN e 1,0 kN - a cada 5 minutos -, sendo feita uma esquematização de reação em que duas estacas empurravam a estaca-teste - por intermédio de um tirante (perfil metálico). Completando o comprimento do tirante, entre a viga e a estaca-teste, instalou-se um macaco hidráulico. Os descarregamentos realizaram-se em quatro estágios proporcionais. Para cada estaca utilizou-se uma metodologia diferente de execução de ensaio.

##### 4.2.1 Estaca “A”

Para esse ensaio, foi imposta à estaca um deslocamento horizontal - ao nível do terreno - de 30 mm, para incrementos de carga de 0,5 kN.

##### 4.2.2 Estaca “B”

Para essa estaca foram realizados três ciclos de carregamentos (com incrementos de 1,0 kN) junto ao seu topo. No primeiro ciclo, efetuaram-se carregamentos que mobilizaram a estaca horizontalmente em até 20 mm, para, em seguida, após o seu descarregamento, aplicar-se um segundo ciclo de mais 20 mm. Após a realização dos dois ciclos iniciais, foi efetuada uma escavação (1,5x1,5x1,5)<sup>m</sup> no solo, ao redor da estaca, para em seguida executar-se uma compactação do mesmo, em 9 camadas, até o nível do terreno anteriormente existente. Em seguida, procedeu-se a rotina para a realização do terceiro ciclo de carregamento - com o solo compactado (grau de compactação médio de 93,9%). Para este ciclo levou-se a estaca até deslocamento horizontal de 20 mm.

##### 4.2.3 Estaca “C”

Esta estaca foi ensaiada através de três ciclos de carga, com acréscimos de carga de 1,0 kN. Os dois primeiros, realizados com o solo em seu estado natural e, o terceiro, com pré-inundamento. Nos ciclos iniciais levou-se a estaca a dois deslocamentos de 20 mm. Após a realização destes ciclos, foi aberta uma pequena cava (suficiente para manter uma lâmina de água com 10 cm de altura) em torno do topo da estaca e, efetuados quatro furos a trado (com 10 cm de diâmetro) - nas extremidades da mesma - de 1,5 m de profundidade. Em seqüência, iniciou-se a inundação do terreno por um período de 63 horas (com vazão de 0,5 m<sup>3</sup>/h). Decorrido este período, iniciou-se o terceiro ciclo de carga, levando o mesmo até um deslocamento horizontal de 35 mm.

5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

São analisadas as três estacas (“A”, “B” e “C”) submetidas a carregamentos horizontais, tendo sido medidos os deslocamentos de suas cabeças e suas inclinações em profundidade. Na Figura 4, pode ser visualizada a curva carga *versus* deslocamento para a estaca “A”. Com relação às estacas “B” (Figura 5) e “C” (Figura 6), pode ser visto que o primeiro carregamento modifica totalmente o comportamento carga *versus* deslocamento num segundo carregamento, observando-se, no entanto, aproximadamente o mesmo deslocamento para a carga máxima do ciclo anterior.

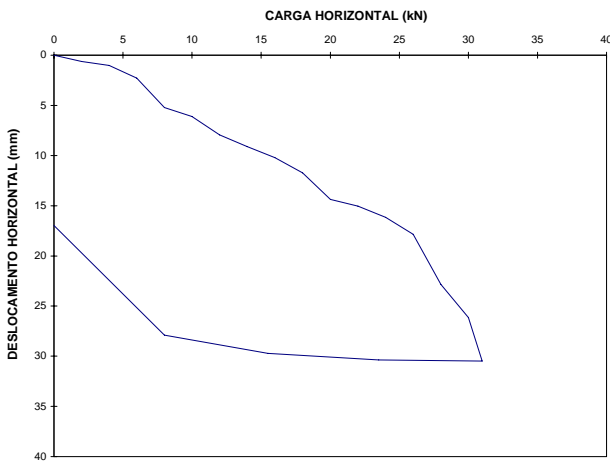


Figura 4. Carga *versus* deslocamento (estaca “A”)

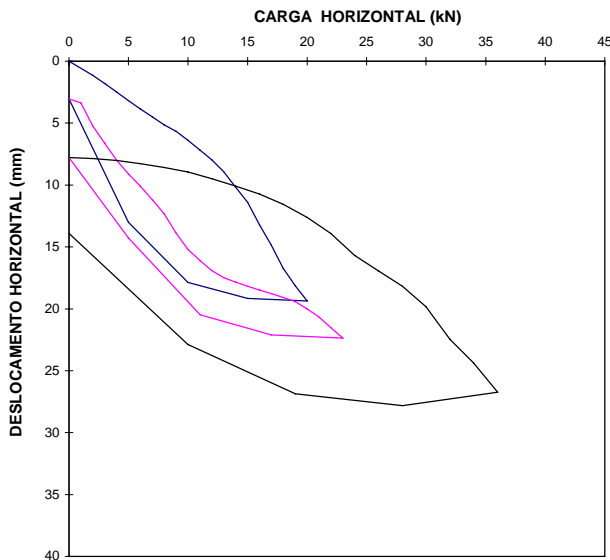


Figura 5. Provas de carga horizontais (estaca “B”)

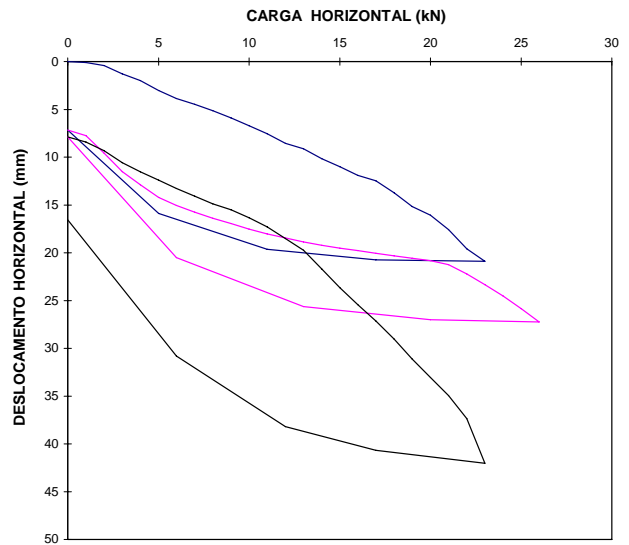


Figura 6. Provas de carga horizontais (estaca “C”)

Para os diversos carregamentos realizados, determinou-se o valor do coeficiente de reação do solo (Tabela 1), utilizando-se a expressão proposta por Alizadeh & Davisson (1970). Os valores de  $\eta_H$  foram determinados para um intervalo de deslocamentos compreendidos entre 6,0 e 12,0 mm. Para o primeiro carregamento, o valor médio de  $\eta_H$  obtido foi de 1313 kN/m<sup>3</sup>. Este resultado está abaixo do valor indicado por Davisson (1963) para as areias fofas ( $\eta_H = 2600$  kN/m<sup>3</sup>), porém, acima dos obtidos por Miguel (1996), para estacas tipo “apiloadas” ( $\eta_H = 300$  kN/m<sup>3</sup>) e, para estacas escavadas ( $\eta_H = 650$  kN/m<sup>3</sup>), executadas na cidade de São Carlos (SP), cujo solo é semelhante ao da cidade de Ilha Solteira (SP). Para as estacas “B” e “C”, observa-se que o primeiro carregamento modifica totalmente o comportamento carga *versus* deslocamento num segundo carregamento, observando-se, no entanto, aproximadamente o mesmo deslocamento para a carga máxima do ciclo anterior. Os resultados de  $\eta_H$  reduziram-se a aproximadamente 40% do valor obtido no primeiro carregamento.

Tabela 1. Valores de  $\eta_H$  para os 3 carregamentos - intervalo de 6,0 a 12,0 mm

Carregamento	1º Carreg.- $\eta_H$ (kN/m <sup>3</sup> )	2º Carreg.- $\eta_H$ (kN/m <sup>3</sup> )	3º Carreg.- $\eta_H$ (kN/m <sup>3</sup> )
Estaca “A”	1444	-	-
Estaca “B”	1275	509	4069 (*)
Estaca “C”	1221	597	852 (**)
Média de $\eta_H$	1313	553	-

(\*) Solo compacto em 9 camadas (\*\*) Solo pré-inundado por 63 horas

Na a estaca “B” (terceiro carregamento), quando se compactou o solo em torno da cabeça da estaca, verificou-se uma boa melhoria no comportamento da curva carga *versus* recalque. Para um valor de deslocamento igual ao

máximo do carregamento anterior, teve-se um ganho de até cerca de 60% na carga aplicada. O valor de  $\eta_H$  foi aproximadamente 3,2 vezes superior ao obtido para o primeiro carregamento. Para o terceiro carregamento, na estaca “C” (estando o solo inundado), observa-se para um valor de deslocamento igual ao máximo do carregamento anterior, uma redução de 33% na carga aplicada. O trecho inicial da curva carga *versus* recalque, para deslocamentos de até cerca de 15 mm, ficou acima da curva do segundo carregamento, conduzindo a um valor de  $\eta_H$  igual a 852 kN/m<sup>3</sup>.

Para análise da inclinação da estaca em profundidade, obteve-se, por meio das medidas de ângulos e, conhecendo-se os comprimentos dos trechos dos inclinômetros, os deslocamentos horizontais em profundidade. Valores de deslocamentos horizontais

verificados diretamente na cabeça da estaca, obtidos pela medição dos ângulos acusados no equipamento do mini-inclinômetro são apresentados (Tabelas 2, 3 e 4). A comparação desses valores com os acusados nos extensômetros, mostra uma razoável capacidade de obtenção de deslocamentos horizontais através desse aparelho, com diferenças na faixa de 10 a 15% para os deslocamentos maiores. Os resultados obtidos mostram que, os deslocamentos são nulos a partir de 2 metros de profundidade, o que corresponde à cerca de 12 vezes o lado da estaca (0,17 m), com exceção do carregamento efetuado na estaca “C” (solo inundado).

Tabela 2. Deslocamentos do solo - medidos na superfície do terreno - estaca “A”

<b>1º carregamento</b>	<b>5 kN</b>	<b>10 kN</b>	<b>15 kN</b>	<b>20 kN</b>	<b>25 kN</b>	<b>31 kN</b>
$\Delta_{EXTENSÔMETRO}$ (mm)	1,41	6,10	9,55	14,38	16,77	30,47
$\Delta_{MINI-INCLINÔMETRO}$ (mm)	1,66	3,32	6,54	8,99	11,51	23,40

Tabela 3. Deslocamentos do solo - medidos na superfície do terreno - estaca “B”

<b>1º carregamento</b>	<b>5 kN</b>	<b>10 kN</b>	<b>15 kN</b>	<b>20 kN</b>			
$\Delta_{EXTENSÔMETRO}$ (mm)	3,19	6,38	11,39	19,37			
$\Delta_{MINI-INCLINÔMETRO}$ (mm)	1,58	4,98	9,09	15,70			
<b>2º carregamento</b>	<b>5 kN</b>	<b>10 kN</b>	<b>15 kN</b>	<b>20 kN</b>	<b>23 kN</b>		
$\Delta_{EXTENSÔMETRO}$ (mm)	6,06	12,16	15,12	16,97	19,32		
$\Delta_{MINI-INCLINÔMETRO}$ (mm)	5,68	10,82	12,38	14,92	16,49		
<b>3º carregamento (*)</b>	<b>5 kN</b>	<b>10 kN</b>	<b>15 kN</b>	<b>20 kN</b>	<b>25 kN</b>	<b>30 kN</b>	<b>37 kN</b>
$\Delta_{EXTENSÔMETRO}$ (mm)	0,33	1,16	2,62	4,84	8,51	12,04	20,26
$\Delta_{MINI-INCLINÔMETRO}$ (mm)	0,79	1,58	2,36	4,79	7,32	10,65	17,20

(\*) Solo compactado

Tabela 4. Deslocamentos do solo - medidos na superfície do terreno - estaca “C”

<b>1º carregamento</b>	<b>5 kN</b>	<b>10 kN</b>	<b>15 kN</b>	<b>20 kN</b>	<b>23 kN</b>
$\Delta_{EXTENSÔMETRO}$ (mm)	3,03	6,72	11,01	16,09	20,90
$\Delta_{MINI-INCLINÔMETRO}$ (mm)	2,44	7,58	11,68	15,77	19,10
<b>2º carregamento</b>	<b>5 kN</b>	<b>10 kN</b>	<b>15 kN</b>	<b>20 kN</b>	<b>26 kN</b>
$\Delta_{EXTENSÔMETRO}$ (mm)	7,02	10,36	12,34	13,64	18,66
$\Delta_{MINI-INCLINÔMETRO}$ (mm)	5,59	8,20	9,77	10,57	17,98
<b>3º carregamento (*)</b>	<b>5 kN</b>	<b>10 kN</b>	<b>15 kN</b>	<b>20 kN</b>	<b>23 kN</b>
$\Delta_{EXTENSÔMETRO}$ (mm)	4,51	8,46	15,76	25,17	34,15
$\Delta_{MINI-INCLINÔMETRO}$ (mm)	3,32	6,56	14,05	22,16	30,46

(\*) Solo inundado

## 6 – CONCLUSÕES

O valor médio do coeficiente de reação horizontal do solo ( $\eta_H$ ), determinado utilizando-se a expressão de Alizadeh & Davisson (1963), para intervalos de deslocamento compreendidos entre 6,0 e 12,0 mm, foi de 1313 kN/m<sup>3</sup>. Este valor está abaixo do indicado por Davisson (1963) para areias fofas ( $\eta_H = 2600$  kN/m<sup>3</sup>), porém, superiores aos

encontrados por Miguel (1996), para estacas tipo “apiloadas” ( $\eta_H = 300$  kN/m<sup>3</sup>) e, estacas escavadas ( $\eta_H = 650$  kN/m<sup>3</sup>), executadas em solos semelhantes. Isto indica a cautela que se deve ter na utilização destes valores, principalmente devido aos mesmos serem muito influenciados pelo solo superficial, o qual é sujeito a variações de umidade e graus de compactação devido à ação de agentes externos.

A compactação do solo superficial até 1,50 m de profundidade e, 0,75 m lateralmente, a partir do eixo da estaca, aumentou o valor do coeficiente de reação horizontal em 3,2 vezes, indicando ser esta uma maneira barata e eficiente de aumentar a capacidade de carga a esforços horizontais de estacas implantadas em solos de alta porosidade. A inundação do solo superficial reduziu o valor do coeficiente de reação horizontal ( $\eta_H$ ) em 35%. As medidas de inclinações em profundidade indicaram movimentações de até 2 metros de profundidade, o que corresponde à cerca de 12 vezes o lado (0,17 m) da estaca.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALIZADEH, M.; DAVISSON, M. T. "Lateral Load Tests on Piles-Arkansas River Project". ASCE, v. 96, n. SM5, p. 1583-1604, 1970.

CINTRA, J. C. A. "Uma Análise de Provas de Carga Lateral em Estacas e Comparação com os Métodos da Teoria de Reação Horizontal do Solo". Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos - SP, 150p., 1981.

DAVISSON, M. T. "Estimating Buckling Load for Piles". Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2, Proceedings, São Paulo, SP, 1963.

KIMURA, M. "Field tests and analysis on ultimate behaviour of lateral loading bored piles". International Geotechnical Seminar on Deep Foundation on Bored and Auger Piles, 2, Proceedings, Ghent, 1993.

MATLOCK, H.; REESE, L. C. "Foundation Analysis of Off-Shore Pile Supported Structures". International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 5, Proceedings, Paris, 1961.

MENEZES, S. M. "Análise do Comportamento de Estacas Pré-moldadas em Solo de Alta Porosidade do Interior do Estado de São Paulo". Tese de Doutorado, Escola Politécnica - USP, São Paulo, SP, 377p., 1997.

MIGUEL, M. G. "Execução e Análise de Provas de Carga Horizontal em Estacas em Solo Colapsível". Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos, SP, 162p., 1996.

POULOS, H. G.; DAVIS, E. H. "Settlement of Pile Groups Bearing on Stiffer Strata". ASCE, v. 100, n. GT2, p. 185-190, 1974.